

Methodik für die Migration von Systemen der Eisenbahnleit- und -sicherungstechnik am Beispiel der Einführung von ETCS

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: **Miroslav Obrenovic**

aus: Tuzla / Bosnien-Herzegowina

eingereicht am: 10.06.2009

mündliche Prüfung am: 01.09.2009

Referenten:

Professor Dr.-Ing. Karsten Lemmer

Professor Dr.-Ing. Jörn Pacht

Vorsitz der Prüfungskommission:

Professor Dr.-Ing. Dr. h. c. Eckehard Schnieder

Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik

Band 6

Methodik für die Migration von Systemen der Eisenbahnleit- und -sicherungstechnik am Beispiel der Einführung von ETCS

Miroslav Obrenovic

Herausgeber:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Verkehrssystemtechnik
Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig

ISSN 1866-721X

DLR-TS 1.6

Braunschweig, im Oktober 2009

Institutsdirektor:
Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer

Verfasser:
Miroslav Obrenovic

Vorwort des Herausgebers

Liebe Leserinnen und Leser,

In Ihren Händen halten Sie einen Band unserer Buchreihe „Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik“. In dieser Reihe veröffentlichen wir spannende, wissenschaftliche Themen aus dem Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) und aus seinem Umfeld. Einen Teil der Auflage stellen wir Bibliotheken und Fachbibliotheken für ihren Buchbestand zur Verfügung. Herausragende wissenschaftliche Arbeiten und Dissertationen finden hier ebenso Platz wie Projektberichte und Beiträge zu Tagungen in unserem Hause von verschiedenen Referenten aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik.

Mit dieser Veröffentlichungsreihe verfolgen wir das Ziel, einen weiteren Zugang zu wissenschaftlichen Arbeiten und Ergebnissen zu ermöglichen. Wir nutzen die Reihe auch als praktische Nachwuchsförderung durch die Publikation der wissenschaftlichen Ergebnisse von Dissertationen unserer Mitarbeiter und auch externer Doktoranden. Veröffentlichungen sind wichtige Meilensteine auf dem akademischen Berufsweg. Mit der Reihe „Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik“ erweitern wir das Spektrum der möglichen Publikationen um einen Baustein. Darüber hinaus verstehen wir die Kommunikation unserer Forschungsthemen als Beitrag zur nationalen und internationalen Forschungslandschaft auf den Gebieten Automotive, Bahnsysteme und Verkehrsmanagement.

Im vorliegenden Band wird eine Methodik für die Migration von Eisenbahnleit- und -sicherungstechnik am Beispiel des einheitlichen europäischen Zugsicherungssystems ETCS (European Train Control System) vorgestellt. Diese Methodik objektiviert Entscheidungsprozesse, die mit der Einführung von ETCS und der sukzessiven Ablösung der Alttechnik für zu tätigende Investitionen zu treffen sind. Damit wird eine Möglichkeit zur Kostensenkung geboten, die die Einführung von ETCS für einen reibungslosen und konkurrenzfähigen Schienenverkehr in Europa unterstützt.

Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer

Vorwort des Autors

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Braunschweig.

In den verschiedenen Phasen meiner Forschungsaktivität hat eine Reihe von Personen zum Erfolg dieser Tätigkeit und zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Mein erster Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer – der als Doktor-Vater diese Arbeit betreute – für anregende Diskussionen, hilfreiche Ratschläge, Motivation, Impulse und die geleistete Unterstützung auch nach Beendigung meiner Tätigkeit am DLR.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörn Pacht, dem Leiter des Instituts für Eisenbahnwesen und Verkehrssicherung an der TU Braunschweig, danke ich für die Übernahme des Koreferats und die interessierte Begleitung meiner Forschungsaktivitäten in den letzten Jahren.

Mein Dank gilt außerdem Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Eckehard Schnieder – Leiter des Instituts für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik an der TU Braunschweig – für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Weiterhin danke ich meinen ehemaligen Kollegen vom Institut für Verkehrssystemtechnik des DLR für die sehr schöne gemeinsame Zeit und die dabei gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnisse.

Mein weiterer Dank gilt Studentinnen und Studenten, deren Studien und Diplomarbeiten ich betreuen durfte. Insbesondere sind hier Frau Katja Beck und Herr Christoph Lackhove hervorzuheben, die durch Ihren Einsatz und ihre Kreativität im besonderen Maße zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Darüber hinaus möchte ich mich bei den Kollegen und Vorgesetzten bei der DB Netz AG bedanken, die durch Ihr Interesse und die geleistete Motivation den Abschluss der Arbeit begleitet haben.

Für einen gewissen Ausgleich und den stellenweise notwendigen Abstand von der wissenschaftlichen Arbeit möchte ich mich bei meinen Freunden bedanken. Diese Balance war ein wichtiger Faktor in den vorangegangenen fünf Jahren.

Schließlich möchte ich mich ganz besonders bei meinen Eltern und meiner Freundin Wini bedanken, die mich während des Studiums sowie im Rahmen der Fertigstellung dieser Arbeit begleitet und motiviert haben und durch ihre permanente Zuversicht zum erfolgreichen Abschluss beigetragen haben.

Miroslav Obrenovic

Inhaltsverzeichnis

Vorwort des Herausgebers.....	iii
Vorwort des Autors	v
Abbildungsverzeichnis.....	ix
Tabellenverzeichnis.....	xi
Kurzfassung.....	xiii
Abstract.....	xv
1 Einleitung	1
1.1 Ziel und Ansatz der Arbeit	1
1.2 Motivation und Begriffsbestimmungen	2
1.3 Thematische Ein- und Abgrenzung der Arbeit	6
1.4 Derzeitige Voraussetzungen und Methoden der Migration der Eisenbahn-LST	8
1.5 Struktur der Arbeit	10
2 Phasenmodell für die Migration der Eisenbahnleit- und - sicherungstechnik	13
2.1 Modellbegriff	13
2.2 Prozessdarstellung der Migration	14
2.3 Systembeschreibung.....	19
2.4 European Train Control System (ETCS).....	20
3 System-Vorselektion	27
3.1 Methoden zur Bewertung und Auswahl von technischen Systemen	27
3.1.1 Kapitalwertmethode	28
3.1.2 Nutzwertanalyse	29
3.1.3 Portfoliotechnik	31
3.1.4 Auswahl einer geeigneten Methode.....	32
3.2 Randbedingungen für die System-Vorselektion im Umfeld der ETCS-Migration.....	35
3.2.1 Rechtliche Grundlagen für die ETCS-Einführung	35
3.2.2 Nationale (EBO-) Anforderungen an Zugbeeinflussungssysteme.....	37
4 Entwicklung von Migrationsstrategien	39
4.1 Strategische Ebene der Migration	39
4.1.1 Netzwerkökonomische Betrachtung.....	40

4.1.2	Vorgehen EU – Entscheidungsgrundlage für das ETCS-Rollout.....	46
4.2	Taktische Ebene der Migration	49
4.3	Operative Ebene der Migration.....	51
4.3.1	Basisstrategien für die ETCS-Migration auf operativer Ebene und ihre Visualisierung.....	52
4.3.2	Alternativkonzept der Basisstrategien anhand der Triggerfunktion für die Migration.....	58
4.4	Kopplung der taktischen mit der operativen Ebene der Migration	62
5	Bewertung von Migrationsstrategien	67
5.1	Dauer der Migrationsszenarien	67
5.2	Migrationsprojekte als Investitionen.....	69
5.3	Berechnung der Kennzahlen Kosten und Dauer im Migrationstool	77
5.4	Beispiel einer Korridorberechnung	82
5.5	Ermittlung der Sensitivität von Kennzahlen	89
6	Systemselektion	93
6.1	Fallstudie ETCS.....	94
6.1.1	Monetäre Ebene der EWA: Lebenszyklus- und Migrationskosten	95
6.1.2	Nutzwertanalytischer Teil der Bewertung	97
6.2	Schlussfolgerung über den optimalen Systemwechsel	104
7	Zusammenfassung und Ausblick	109
	Abkürzungsverzeichnis	113
	Literaturverzeichnis	117
A	Anhang	123

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Migration als Technologiesprung (in Anlehnung an [3] [5])	4
Abbildung 2: Treiber und Hemmnisse im Umfeld der ETCS-Migration	5
Abbildung 3: Struktur der Arbeit	10
Abbildung 4: Überblick über den Migrationsprozess für die LST in der Bahndomäne	15
Abbildung 5: Einteilung der Strukturbestandteile der Migrationsprozesse	16
Abbildung 6: Gesamtmethodik für die Entscheidungsunterstützung in Migrationsprozessen	18
Abbildung 7: Schnittstellen der ETCS-Komponenten zum Stellwerk (vereinfachte Darstellung)	24
Abbildung 8: Kompatibilitätsbeziehungen zwischen ETCS und PZB/LZB	25
Abbildung 9: Ablauf der Nutzwertanalyse / in Anlehnung an [64]	30
Abbildung 10: Produktportfolio-Matrix der BCG / in Anlehnung an [10]	31
Abbildung 11: Unterteilung der Verfahren zur Wirtschaftlichkeitsanalyse nach Zangemeister [64]	33
Abbildung 12: Modifizierte 4-Stufen EWA	34
Abbildung 13: Betrachtungsbereich Netzwerkeffekte	42
Abbildung 14: Systemverbund DB AG	43
Abbildung 15: Abhängigkeiten der grundlegenden Nutzenaspekte zwischen EIU und EVU ..	44
Abbildung 16: Reduzierung von Signalen beim Einsatz von ETCS Level 2 [11]	45
Abbildung 17: Das geplante ETCS-Netz / strategische Migration über europäische Korridore / in Anlehnung an [58] [22]	47
Abbildung 18: Wirkungszusammenhänge bei der Erzeugung des volkswirtschaftlichen Nutzens	48
Abbildung 19: Vorwärts- und Rückwärtskompatibilitäten der SRS-Versionen [63]	49
Abbildung 20: Güterkorridor Rotterdam – Genua [22]	51
Abbildung 21: Basis-Migrationspfade für den Übergang von der Indusi zum ETCS Level 1 [39]	53
Abbildung 22: Grafische Darstellung ETCS-Migration - streckenseitige Doppelausrüstung....	55
Abbildung 23: Grafische Darstellung ETCS-Migration - fahrzeugseitige Doppelausrüstung...	56
Abbildung 24: Grafische Darstellung ETCS-Migration - beidseitige Doppelausrüstung	56
Abbildung 25: Grafische Darstellung ETCS-Migration - STM-Strategie	57
Abbildung 26: Definition von Streckenabschnitten innerhalb der Korridore, in Anlehnung an [29]	63
Abbildung 27: Beschreibung eines internationalen Beispielkorridors, in Anlehnung an [29] ..	64
Abbildung 28: Migrationsplanung Korridor Rotterdam – Genua, Stand 06 / 2009 (in Anlehnung an [61])	68

Abbildung 29: Gantt-Darstellung der operativen Ebene der Migration auf Streckenabschnitten und dem zugehörigen Fahrzeugpark.....	69
Abbildung 30: Eingabemaske im Migrationstool	79
Abbildung 31: Grafische Kostendarstellung – Zeit in Jahren, Kosten in €	80
Abbildung 32: Alternative Kostendarstellung durch Excel-Export	80
Abbildung 33: Portfoliodarstellung der Kennzahlen Kosten und Zeit der verschiedenen Migrationsstrategien.....	81
Abbildung 34: Konfiguration Beispielkorridor.....	83
Abbildung 35: Jährliche Migrationskosten Abschnitt 1	84
Abbildung 36: Kumulierte Migrationskosten Abschnitt 1.....	85
Abbildung 37: Jährliche Migrationskosten Abschnitt 4 Limited Supervision	86
Abbildung 38: Kumulierte Migrationskosten Abschnitt 4 Limited Supervision	86
Abbildung 39: Bestandsveränderungen Altsystem und ETCS Auf dem Abschnitt 4 des Beispielkorridors für die Migrationsstrategie Doppelausrüstung Streckenseitig	87
Abbildung 40: Vergleich der Migrationsszenarien für den Streckenabschnitt 4.....	89
Abbildung 41: Aufbau des Morphologischen Merkmalschemas [25]	90
Abbildung 42: Sensitivität der Migrationskosten in Abhängigkeit der Anschaffungskosten... ..	92
Abbildung 43: Portfoliodarstellung des Lösungsraumes als Entscheidungsunterstützung.....	94
Abbildung 44: Produktlebenszyklusphasen (in Anlehnung an [14])	95
Abbildung 45: Verdopplung des Schienengüteraufkommens auf dem Korridor A (in Anlehnung an [61])	100
Abbildung 46: Kapazität einer HGV-Strecke [62]	101
Abbildung 47: Kapazität einer konventionellen Strecke [62]	102
Abbildung 48: Ergebnis der EWA als Portfolio	105
Abbildung 49: Datenbasis für die in der Fallstudie durchgeführte Kalkulation	124
Abbildung 50: Jährliche Migrationskosten Abschnitt 4 Level 1	125
Abbildung 51: Kumulierte Migrationskosten Abschnitt 4 Level 1	125
Abbildung 52: Jährliche Migrationskosten Abschnitt 4 Level 2.....	126
Abbildung 53: Kumulierte Migrationskosten Abschnitt 4 Level 2	126
Abbildung 54: Jährliche Migrationskosten Abschnitt 4 Alternativstrategie Limited Supervision	127
Abbildung 55: Kumulierte Migrationskosten Abschnitt 4 Alternativstrategie Limited Supervision.....	127
Abbildung 56: Maske für die Auswahl von anzuzeigenden Kennzahlen.....	129
Abbildung 57: Eingabemaske für die manuelle Strategie	129

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der verschiedenen ETCS-Level	23
Tabelle 2: Vergleich der Anforderungen an die Streckenausrüstung bei verschiedenen Betriebsverfahren und Streckentypen [51]	37
Tabelle 3: Ausrüstungs- und Zeitplan Korridor A / in Anlehnung an [46]	50
Tabelle 4: Basisszenarien für die ETCS-Migration	52
Tabelle 5: Kostentreiber der ETCS-Migration / in Anlehnung an [9]	61
Tabelle 6: Eingabedaten Migrationstool	78
Tabelle 7: Ergebnisse der Bewertung von Migrationsstrategien	88
Tabelle 8: Beispiel der verschiedenen Datenausprägung der ETCS-Kennzahlen	91
Tabelle 9: LCC / Anteil Betreiber	96
Tabelle 10: Kennzahl der monetären Ebene der EWA	96
Tabelle 11: Punkteskala des paarweisen Vergleichs	97
Tabelle 12: Ergebnis des paarweisen Vergleichs	98
Tabelle 13: Aspekte des Teilnutzens in der Kostenbeeinflussung der LST	99
Tabelle 14: Teilnutzen Kostenbeeinflussung LST	100
Tabelle 15: Teilnutzen Kapazität	103
Tabelle 16: Teilnutzen Migrationsdauer	104
Tabelle 17: Ergebnisse des nutzwertanalytischen Teils der EWA	104
Tabelle 18: Ergebnis der EWA	105
Tabelle 19: Nutzwertermittlung	128

Kurzfassung

Moderne Systeme der Eisenbahnleit- und -sicherungstechnik (LST) unterliegen aufgrund eines zunehmenden Elektronikanteils immer schneller werdenden Innovationszyklen. Zusätzlich tragen die sich aus der Globalisierung ableitenden Anforderungen an Verkehrsträger zum erhöhten Innovationsbedarf auch im System Bahn bei. Einführung technischer Innovationen in bestehende betrieblich-technische Umgebungen mit einer sukzessiven Ablösung der Alttechnik wird in diesem Zusammenhang *Migration* genannt.

Die Migration des europäisch einheitlichen Zugsicherungssystems ETCS (European Train Control System) soll die historisch gewachsene heterogene Landschaft der nationalen Techniken ablösen und somit einen Beitrag zum interoperablen Eisenbahnverkehr in Europa liefern. Dies ist aufgrund einer Vielzahl der dabei relevanten Einflussparameter und Randbedingungen ein komplexer Prozess, in dessen Rahmen Entscheidungen hinsichtlich der optimalen Strategie getroffen werden müssen.

Die vorliegende Arbeit zielt auf die Entwicklung einer durchgängigen Methodik für die systematische Unterstützung der Entscheidungsprozesse im Rahmen der Migration von Systemen der LST am Beispiel ETCS. Einzelne Methoden aus den Wirtschafts-, Eisenbahnbetriebs- und Ingenieurwissenschaften werden adaptiert und zu einer innovativen Gesamtmethodik kombiniert. Diese soll einen Beitrag zur effizienten Einführung technischer Innovation in das System Bahn liefern. Entlang eines für den Migrationsprozess entwickelten Phasenmodells – das auf der Selektion eines optimalen Zielsystems und der Entwicklung und Bewertung der möglichen dazugehörigen Migrationsstrategien basiert – werden u. a. folgende Ergebnisse erzielt:

- Beschreibung der Wirkungszusammenhänge zwischen den Randbedingungen und Einflussparametern der ETCS-Migration hin zu einem ganzheitlichen Entscheidungsmodell
- innovativer Ansatz zur Strukturierung der Entwicklung von Migrationsstrategien für ETCS entlang der Phasen des betriebswirtschaftlichen Planungsprozesses mit der Einordnung der strategischen Ebene in das netzwerkökonomische Umfeld der Makroökonomik
- Entwicklung einer Berechnungsvorschrift für die Ermittlung der Migrationskosten einzelner Strategien und Abbildung der Algorithmen in einer Softwareanwendung

Zum Nachweis der Anwendbarkeit der Methodik wird im Rahmen einer Fallstudie der Entscheidungsprozess der ETCS-Migration auf Basis eines konstruierten Eisenbahn-Korridors durchgeführt. Dabei wird gezeigt, dass die Methodik die Voraussetzungen bereit stellt, anhand von definierten Randbedingungen und Bewertungskriterien eine für die jeweilige Anwendung nachvollziehbare und reproduzierbare Handlungsempfehlung zu formulieren.

Der Nutzen dieser Arbeit liegt somit in der Objektivierung der Entscheidungen für die zu tätigen Investitionen in die ETCS-Migration und der damit realisierbaren Kostensenkung im investiven sowie im operativen Bereich auf Basis der Identifikation eines fallweise optimalen Zielsystems und der jeweiligen Migrationsstrategie.

Abstract

Due to the fact that currently applied systems of railway operations control are basically composed of electronic components, innovation cycles of these technologies become increasingly faster. Furthermore requirements given by a globalization and the European single market additionally contribute to an increased demand on innovations within the railway system. The implementation of innovative technologies into existing operational and technical environments conjoined with a stepwise replacement of previous systems is defined as *migration*.

Providing significant contribution to seamless and interoperable cross-border rail traffic, on the long term ETCS is designed to substitute the heterogeneous landscape of existing national train protection systems in Europe. Due to a number of relevant boundary conditions, specific constraints and influencing factors, ETCS migration can be characterized as a very complex process. Along this process decisions towards the optimal strategy are to be made.

This thesis aims at the development of an integrated methodology for systematic decision support within the migration of railway operations control using the example ETCS. This methodology contains single methods from economics, railway operations and engineering sciences. These are partially being adopted and finally combined to an innovative integrated methodology, thus contributing to an efficient implementation of technical innovations into the railway system. Along the phase model for the description of the migration process developed within this thesis, following results are being elaborated:

- Description of interdependencies between single constraints and influencing factors of ETCS migration towards a holistic decision model
- Innovative approach for process structure of development of migration strategies along the phases of business administration planning process. Thereby strategic aspects are being classified within the scope of macroeconomics referring on key rules of network externalities
- Development of an algorithm for the assessment of migration costs caused by each strategy and implementation in a software application

In order to proof the feasibility of the developed methodology a case study based on a synthetic ETCS corridor has been carried out. Thereby it has been shown, how according to defined boundary conditions and assessment criteria a traceable, plausible and correct recommendation can be generated.

The main benefit of this thesis is the provision of an approach to objectify the decisions on investments to be done for the ETCS migration and thus realizing cost reduction with respect to capital as well as operative expenditures. Basis therefore is the systematic and methodical identification of optimal target states as well as the correspondent migration strategy for each application case relating to ETCS migration.

1 Einleitung

Das immer stärker zusammen wachsende Europa braucht einen leistungsfähigen Schienenverkehr, um dem steigenden Mobilitätsbedürfnis – insbesondere auch im grenzüberschreitenden Verkehr – gerecht zu werden. Konkret erfordert der Wettbewerb gegenüber dem Straßen- und Luftverkehr effiziente technische Systeme, die zu einer verbesserten Wirtschaftlichkeit und höheren Leistungsfähigkeit der Schieneninfrastruktur beitragen. Nur so lassen sich die Transportleistungen zu den Wettbewerbsbedingungen erbringen, die langfristig das Transportaufkommen auf die Schiene verlagern.

Damit die Eisenbahn als europäisches Verkehrsmittel konkurrenzfähig wird, muss ein über die Staatsgrenzen hinweg interoperabler Bahnverkehr gewährleistet werden. Das betrifft neben einer einheitlichen Spurbreite, Lichtraumprofil und Spannungsversorgung besonders die Leit- und Sicherungstechnik. Diese für die Interoperabilität internationaler Verkehre erforderliche Vereinheitlichung der Zugsicherungstechnik erfordert eine kostenintensive Migration der nationalen Systeme auf das einheitliche europäische Zugsicherungs- und -beeinflussungssystem ETCS (European Train Control System).

Die Notwendigkeit für die ETCS-Migration liegt in der Tatsache begründet, dass zwar ein europäischer Wirtschaftsraum entstanden ist und damit auch das grenzüberschreitende Verkehrsaufkommen wächst, ein europaweit interoperabler Schienenverkehr jedoch historisch gewachsene große technische und betriebliche Hürden vorfindet.

Mit der Umrüstung auf ein einheitliches System soll auch die Liberalisierung des Verkehrsmarktes voran getrieben werden. Dabei ist ein in hohem Maße koordiniertes Vorgehen unbedingt notwendig. Das betrifft sowohl die technischen Standards als auch die Einführungsstrategie der neuen Leit- und Sicherungstechnik. Die Kriterien in diesem Prozess sind die Sicherstellung einer bedarfsgerechten Leistungsfähigkeit und Sicherheit, die Minimierung der entstehenden Kosten und eine möglichst schnelle Nutzengenerierung. Komplexe Einflussparameter und die zum Teil heterogenen Interessen einer Vielzahl an Interessensgruppen gilt es in Einklang zu bringen, um den Migrationsprozess zielgerichtet und optimal einleiten und durchführen zu können.

1.1 Ziel und Ansatz der Arbeit

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Vorstellung einer durchgängigen Methodik für die systematische Unterstützung der komplexen Entscheidungsprozesse im Rahmen der Systemselektion sowie der Entwicklung und Bewertung von Migrationsstrategien für die Eisenbahnleit- und -sicherungstechnik (LST). Dabei wird die Effizienz einzelner ausgewählter Teilprozesse durch eine Softwareunterstützung gesteigert. Die Methodik wird auf die Migration des einheitlichen europäischen Zugsicherungssystems ETCS angewendet.

Basierend auf einer Strukturierung von Migrationsabläufen wird der Entscheidungsprozess hinsichtlich der Planung einer Systemmigration modelliert und methodisch abgebildet. Dies betrifft insbesondere die Bereiche Systemauswahl sowie Entwicklung und Bewertung von Migrationsstrategien.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden folgende Teilziele angestrebt:

- Abbildung des relevanten wissenschaftlichen und technischen Umfelds im Bezug auf die Themenstellung der ETCS-Migration
- Einordnung der vorliegenden Arbeit in dieses Umfeld
- Vorstellung und ggf. geeignete Abwandlung der eingesetzten Methoden, die hier erstmalig zu einer durchgängigen und abgeschlossenen Methodik für die Systemselektion sowie die Entwicklung und Bewertung von Migrationsstrategien am Beispiel ETCS zusammen gefasst worden sind
- Entwicklung eines Phasenmodells für die Beschreibung der Migrationsprozesse im Umfeld der LST und insbesondere für die Entwicklung und Bewertung der entsprechenden Migrationsstrategien
- Darstellung der Einflussparameter und Randbedingungen für die Migration der LST und insbesondere des Zugsicherungssystems ETCS
- Beschreibung der Wirkungszusammenhänge zwischen diesen Faktoren hin zu einem ganzheitlichen Entscheidungsmodell
- Innovativer Ansatz zur Strukturierung der Entwicklung von Migrationsstrategien für das System ETCS entlang der Phasen des betriebswirtschaftlichen Planungsprozesses
- Erstmalige Einordnung der strategischen Ebene der ETCS-Migration in ein netzwerkökonomisches Umfeld der Makroökonomik
- Entwicklung einer Berechnungsvorschrift für die Ermittlung der Migrationskosten einzelner Strategien
- Entwicklung und Einsatz eines Software-Werkzeugs zur Unterstützung ausgewählter Teilprozesse
- Anwendung der Methodik anhand einer konstruierten Fallstudie für den Prozess der ETCS-Migration

Die dabei entwickelte und angewendete Methodik soll zur Systematisierung der Migrationsvorgänge im Umfeld der LST und insbesondere im Rahmen der ETCS-Migration beitragen und eine objektive Grundlage für die entsprechenden Entscheidungen liefern.

1.2 Motivation und Begriffsbestimmungen

Migration wird in der Literatur unterschiedlich definiert und interpretiert. Aus dem Lateinischen abgeleitet bedeutet der Begriff „einflussbedingte Wanderung“ und wird als solcher zumeist in den Sozialwissenschaften behandelt [55]. Mit dieser Definition wird jedoch gleichzeitig die mit dem Übergang in eine neue Systemwelt verbundene Problematik zutreffend beschrieben [12]. Dabei ist als System allgemein „...eine Anzahl über physische Netze in Wechselwirkung stehender Funktionselemente...“ zu verstehen [3].

Diese Definition ist auf eine Technologiemigration übertragbar. Im Umfeld der Informations- und Kommunikationstechnologie (IuK) wird in diesem Zusammenhang häufig von Client-Server-Architekturen und ihrem Down- bzw. Rightsizing gesprochen [5]. Die besondere Her-

ausforderung im Übergangsprozess stellt dabei die Koordination zwischen der IT-Architektur einerseits und der Daten andererseits dar. Eine ähnliche Konstellation wird ebenfalls im Bereich der Eisenbahnleit- und -sicherungstechnik vorgefunden und im weiteren Verlauf thematisiert.

In [57] berichtet Stephan im Zusammenhang mit Prozessleit- und -automatisierungssystemen von einem Vorgang des Übergangs von einer Produkt- und Systemgeneration auf die Nächste, wobei eine systematische Berücksichtigung von bestehenden Lösungen, Installationen und Anwendungen impliziert wird.

Um eine Gültigkeit für das Technologieumfeld allgemein sowie die Eisenbahndomäne speziell zu erreichen, bedarf es einer Begriffsabgrenzung und Abstraktion.

Vor dem Hintergrund des hohen Durchdringungsgrades des heutigen Systems Eisenbahn mit den Systemen der Leit- und Sicherungstechnik kann bei der Einführung neuer Technik nicht von einer technologischen grünen Wiese ausgegangen werden. Ebenso wenig besteht aufgrund finanzieller, organisatorischer, kapazitiver und weiterer Restriktionen die Möglichkeit, alle vorhandenen Systeme im Rahmen eines Großprojektes an einem bestimmten Stichtag auszutauschen. Es bleibt der Weg einer schrittweisen Ablösung des Ist- durch das Zielsystem.

Der Begriff Migration beschreibt somit einen schrittweisen Systemübergang vom Ist- zu einem gewünschten Zielzustand im Rahmen der Einführung technologischer Innovationen in ein bestehendes betrieblich-technisches Umfeld.

Dieser Prozess ist in der Eisenbahndomäne durch eine Vielzahl heterogener Kriterien und Randbedingungen charakterisiert. Insbesondere die migrationssensitive Eisenbahnleit- und -sicherungstechnik stellt durch ihre verteilte (strecken- und fahrzeugseitige) Funktionsallokation eine besondere Herausforderung an den Migrationsprozess. Im Gegensatz zu den Systemübergängen bzw. Systemwechseln, die durch Diffusionsprozesse auf Individualebene getrieben werden (beispielsweise das Kaufverhalten für die Endgeräte bei der Einführung eines neuen Telekommunikationsnetzes), handelt es sich bei der Einführung der LST um zentral gesteuerte Entscheidungen und Prozesse. Bei solchen Systemeinführungen sind Produkteigenschaften wie Kompatibilität und Komplexität von besonderer Relevanz bei der Gestaltung der Migrationsstrategie [19]. Die Funktionsfähigkeit des Bahnbetriebs während der Migration stellt dabei die zentrale Randbedingung für den Prozess dar. Aus diesem Grund ist der zeitweise Parallelbetrieb des aktuellen mit dem Zielsystem eine weitere charakteristische Eigenschaft der Migrationsprozesse in der Eisenbahndomäne.

Es sind jedoch in der Regel weitere Anforderungen vorhanden, die an den Migrationsprozess gestellt werden. Beispielsweise wird bei der Einführung von ETCS die Erhöhung oder zumindest die Beibehaltung der betrieblichen Leistungsfähigkeit sowie einer hohen Verlässlichkeit bei niedrigen Lebenszyklus- und insbesondere Migrationskosten unter Gewährleistung der Interoperabilität gefordert. Hinzu kommen die Anforderungen der zum Teil offenen Fahrzeugumläufe sowie der prinzipiellen Vermischung von Personen- und Güterverkehr.

In diesem Zusammenhang entsteht ein mehrdimensionales Optimierungsproblem hinsichtlich technischer, betrieblicher, politischer und weiterer Aspekte unter Berücksichtigung der betriebswirtschaftlichen Effizienz sowie der maßgeblichen Vorgabe der positiven volkswirtschaft-

lichen Effekte und eines hohen Sicherheitsniveaus des Systems Eisenbahn. Eine globaloptimale Migration neuer Technologien erfordert somit eine systematische Vorgehensweise in allen Phasen eines Migrationsvorhabens unter Nutzung mathematischer, betriebs- und volkswirtschaftlicher, natur- sowie eisenbahnbetriebswissenschaftlicher Methoden und Modelle. Der Kosten- bzw. Zeitaufwand und die betriebliche Einschränkung einerseits sowie der betriebliche und ggf. wirtschaftliche Nutzen andererseits hängen dabei unmittelbar mit der gewählten Migrationsstrategie zusammen.

Neben der Vorgehensweise im Migrationsprozess selbst ist auch die grundsätzliche Migrationsfähigkeit innovativer technischer Systeme als weiterer entscheidender Faktor für den Migrationsaufwand anzusehen. Dabei ist insbesondere die Schnittstellenproblematik bei der Integration in bestehende Systemumgebungen sowie die Skalierbarkeit der funktionalen und nicht-funktionalen Systemeigenschaften zu beachten. Die u. a. dadurch determinierte Komplexität und Kompatibilität eines technischen Systems stellt – wie oben bereits erwähnt – wichtige Eigenschaften im Migrationsprozess dar.

Es können einige Beispiele technischer Systeme aus der Eisenbahndomäne genannt werden, deren Migration sich als sehr schwierig erwiesen hat oder immer noch erweist:

- Funkfahrbetrieb
- ETCS
- Stellwerkstechnik

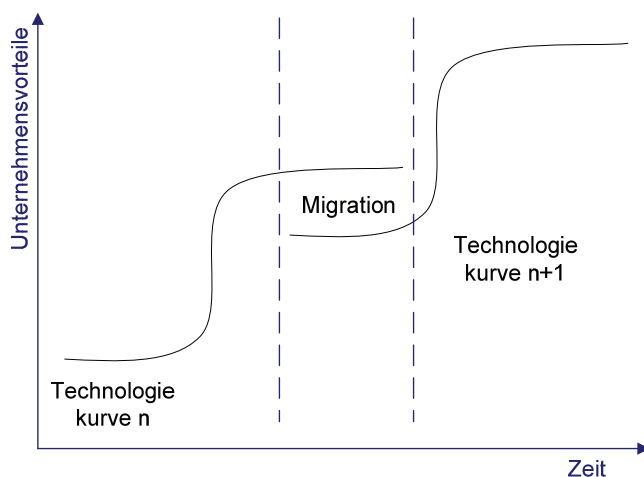


Abbildung 1: Migration als Technologiesprung (in Anlehnung an [3] [5])

Die Komplexität des Systemwechsels ist – wie oben bereits erwähnt – in der IT-Domäne ebenfalls anzutreffen. Einerseits ist die Systemmigration eines klar definierten Systems ein einmaliges, zeitlich begrenztes Vorhaben, das in der Regel einen Technologiesprung bedeutet (Abbildung 1). Andererseits trifft dies in komplexen Umgebungen nur bedingt zu, da immer schnellere Innovationszyklen die Systemmigration zu einem permanenten Zustand machen. Deshalb muss die Systemmigration als phasenweiser Prozess ausgelegt und eine damit verbundene

parallele Koexistenz alter und neuer IuK-Welten berücksichtigt werden [5]. Aufgrund der gegebenen Komplexität hat beispielsweise das Bundes-Innenministerium einen Leitfaden herausgegeben, nach dem die Hard- und Softwemigration der staatlichen Behörden vollzogen werden soll [28].

Einsatz elektronischer Komponenten im Bereich der Eisenbahnleit- und -sicherungstechnik bringt eine analoge Veränderung der Innovationszyklen mit sich. Auf diese Art steht die Eisenbahndomäne insbesondere im Bereich der elektronischen Stellwerkstechnik (ESTW), der Leitsysteme sowie der Zugbeeinflussung vor ähnlichen Herausforderungen hinsichtlich der Migrationsprozesse. Eine durchgängige Methodik soll dabei eine objektive Entscheidungsunterstützung bieten und die künftigen Migrationsprozesse effizienter gestalten.

Mit der fortschreitenden Europäisierung der Bahnen ist die Einführung von ETCS in Deutschland gesetzlich für Hochgeschwindigkeitsstrecken, Neu- und Ausbaustrecken sowie ausgewählte Korridore des konventionellen Bahnsystems im Netz festgelegt (s. dazu 3.2.1).

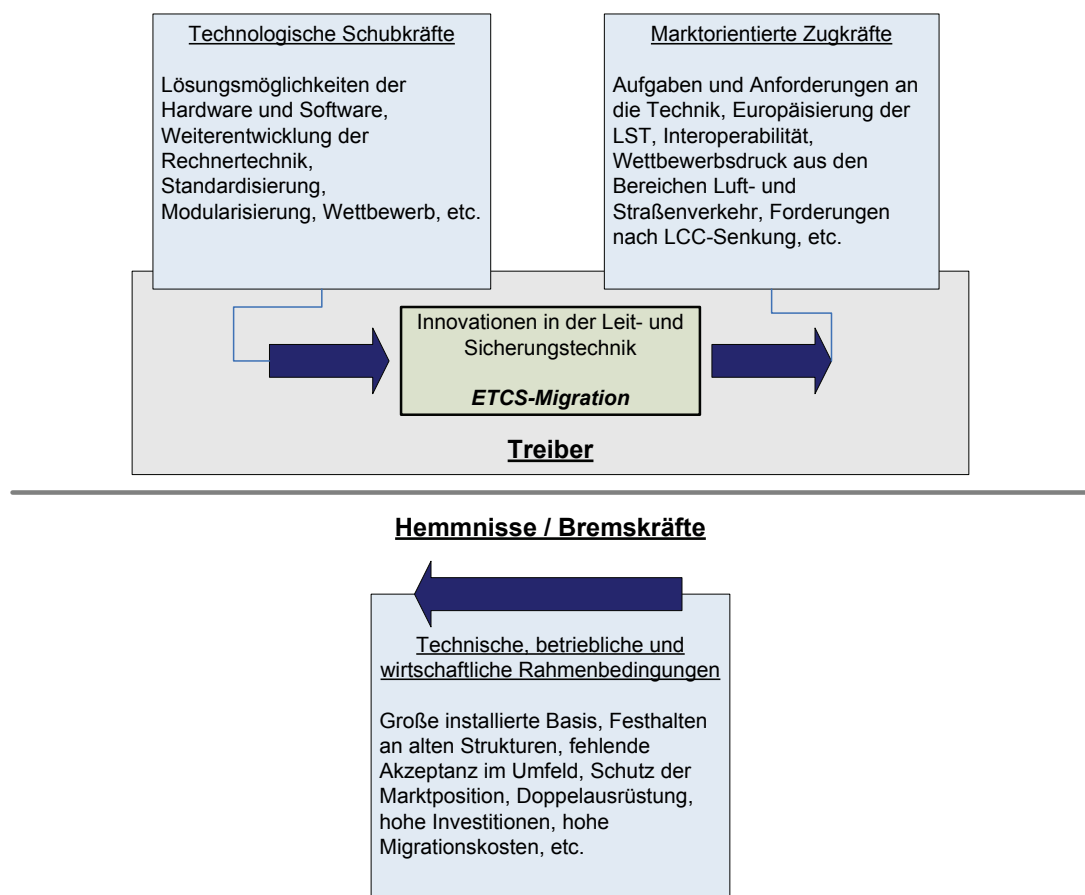


Abbildung 2: Treiber und Hemmnisse im Umfeld der ETCS-Migration

Neben der technischen und betrieblichen Herausforderung, ETCS im Netz der DB AG zu integrieren, beeinflusst der Investitionsbedarf für ETCS die Mittelallokation für im Rahmen des verfügbaren Budgets schwerwiegend. Diese zusätzliche Belastung des LST Budgets muss

durch einen bedarfsgerechten Einsatz der unterschiedlichen ETCS-Level sowie einer optimierten Einführungsstrategie minimiert werden.

Das Umfeld der ETCS-Migration mit seinem Zug- und Schubkräften einerseits und den Hemmnissen andererseits ist in der Abbildung 2 skizziert.

Insbesondere sind hier die spezifischen Charakteristika des Marktes für Leit- und Sicherungstechnik zu nennen, in dem wenige Hersteller eine gefestigte Markposition bezogen haben. Die Entwicklung und Einsatz einer europäisch standardisierten Technik und eine damit einhergehende Offenlegung von technischen Schnittstellen erzeugt hingegen einen Wettbewerb, der auf Seiten der Industrie Gewinner und Verlierer produzieren wird. Diese Marktmechanismen tragen dazu bei, dass verschiedene Hersteller der Leit- und Sicherungstechnik mit unterschiedlich ausgeprägter Motivation die ETCS-Entwicklung und -Migration voran treiben.

Dieses Spannungsfeld erfordert systematische Entscheidungen für einen effizienten Ressourceneinsatz hin zur optimalen Migrationsstrategie.

1.3 Thematische Ein- und Abgrenzung der Arbeit

Aufgrund der hohen Komplexität des Themenbereichs ETCS-Migration, konzentriert sich diese Arbeit auf ausgewählte Aspekte und Fragestellungen, die für die methodische Unterstützung der Entscheidungsprozesse relevant sind. Neben der Annahmen und Randbedingungen, die im Rahmen der Arbeit beschrieben werden, sollen hier einige Grundsätze zum Verständnis der Herangehensweise zusammengefasst werden.

- Die Prozessschritte der Entwicklung und der Bewertung von Migrationsstrategien, die im Rahmen der in dieser Arbeit vorgestellten Methodik adressiert werden, behandeln in erster Linie die Sicht der Bahnunternehmen (Eisenbahninfrastrukturunternehmen, Eisenbahnverkehrsunternehmen). Die für die Signalbauindustrie relevanten Prozesse der Entwicklung, des Testens sowie der Zulassung einer neuen Technik werden in dieser Arbeit nicht behandelt.
- Die detaillierte Beschreibung der technischen Systeme und insbesondere des Systems ETCS ist kein originärer Bestandteil der Arbeit. Im Abschnitt 2.4 wird die Produktstruktur von ETCS skizziert. Für weiterführende Abhandlungen zu diesem Thema sowie zu weiteren europäischen Zugsicherungssystemen sei an dieser Stelle u. a. auf die Arbeiten von Pacht und Meyer zu Hörste verwiesen [44] [34].
- Das System GSM-R, welches als Kommunikationsplattform für eine Anzahl an ETCS-Funktionen angewendet wird, soll im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet werden. Dies bezieht sich sowohl auf die technische Systembeschreibung als auch auf die Migrationsstrategien. Zu diesem Themenbereich können u. a. [53] oder Berichte von der ERTMS-Konferenz 2003 in Leipzig hinzugezogen werden. Die Anwendung der hier vorgestellten Methodik auf das System GSM-R könnte in weiterführenden Arbeiten realisiert werden.
- Das Ergebnis der vorliegenden Arbeit soll keine konkrete Empfehlung über die ideale ETCS-Systemausprägung und die dazugehörige Migrationsstrategie für das künftige ETCS-Netz sein. Dafür sind einerseits die Parameter wie Kosten und Umbaukapazitäten

noch nicht stabil genug, andererseits ist die Beantwortung der Frage nach der optimalen Lösung stets an die konkrete Anwendung bzw. die Präferenzen des Entscheiders geknüpft. Vielmehr soll hier ein Prozess sowie die dazugehörigen methodischen Schritte beschrieben werden, die dem jeweiligen Entscheider das geeignete Werkzeug bereitstellen, eine objektive Entscheidung treffen zu können.

- Im Rahmen der Bewertung von Migrationsstrategien sowie im methodischen Schritt der Systemauswahl findet eine Betrachtung der Kosten aus der Systemsicht statt. Eine Einbindung der Baukostenzuschüsse oder Darlehen für einzelne Unternehmen wird somit – im Gegensatz zur Arbeit von Schroeder [9] – nicht berücksichtigt. Die aktuellen Randbedingungen hinsichtlich der Subventionsrichtlinien sind insbesondere auf europäischer Ebene unsicher. Auf die Aspekte der Förder- bzw. Subventionspolitik wird in Rahmen der netzwerkökonomischen Untersuchungen (Abschnitt 4.1) eingegangen. Diese Fragestellungen sollen jedoch nicht im Fokus dieser Arbeit stehen.
- Für die Bestimmung der Migrationskosten für ETCS spielt aufgrund der vorhandenen Schnittstellen die Stellwerkstechnik eine relevante Rolle. Bei der Entwicklung und Bewertung von Migrationsstrategien für ETCS wird die vorhandene Stellwerkstechnik als vorgegebene Randbedingung betrachtet. Es erfolgt keine Optimierung hinsichtlich der Stellwerksmaßnahmen.
- Betriebliche Flexibilität und die Dimensionierung der Rückfallebene wird als Bewertungskriterium nicht berücksichtigt. Eine Entwicklung und Optimierung der Migrationsstrategien nach diesem Kriterium ist eine der möglichen weiterführenden Arbeiten im Feld der Migration und als solche im Ausblick zu dieser Arbeit adressiert.
- Die Quantifizierung des von der ETCS-Einführung erwarteten Nutzens in Form der Anfrage an internationalen Trassen, der Verringerung der Transportzeiten infolge des interoperablen Verkehrs oder Kostensenkung der Ausrüstung auf Basis des steigenden Wettbewerbs wird in dieser Arbeit nicht vorgenommen. Diese Angaben sind für die Darstellung der Methodik nicht zwingend notwendig.

Konkrete Annahmen insbesondere hinsichtlich der verwendeten Kennzahlen, die den Geltungsbereich der hier vorgestellten Untersuchungen maßgeblich bestimmen, sind den jeweiligen Kapiteln der Arbeit zu entnehmen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass auf Basis dieser Abgrenzung und der oben genannten Randbedingungen der methodische Charakter der Arbeit deutlich wird. Insbesondere aufgrund der unsicheren Datenbasis sowie der jeweils spezifischen Einflussparameter einzelner Anwendungsbereiche kann hier keine allgemein gültige Aussage zum Ablauf der ETCS-Migration formuliert werden.

Eine häufig in Unternehmen zur Bewertung von Investitionsalternativen angewendete Wirtschaftlichkeitsanalyse, in der den Kapital- sowie den operativen Kosten die monetären Nutzeneffekte gegenüber gestellt werden, wird in dieser Arbeit nicht durchgeführt. ETCS ist ein in erster Linie politisch getriebenes System, dessen betriebswirtschaftlicher Nutzen in Form von Rationalisierungseffekten oder der Steigerung von Trasseneinnahmen im Moment nur schwer quantifiziert werden kann.

Eine Untersuchung von betrieblichen Parametern wie Leistungsfähigkeit oder Verfügbarkeit wird hier nicht vorgenommen, es werden allenfalls bereits durchgeführte Untersuchungen auf diesem Feld als Input in die Bewertung aufgenommen.

Die in der Arbeit vorgestellte Methodik bietet dem jeweiligen Entscheider die Möglichkeit, im Rahmen der relevanten Parameter, Randbedingungen sowie der verfügbaren Datenbasis eine systematische Bewertung seiner Handlungsalternativen durchzuführen und so die für ihn in diesem Parameterraum optimale Lösung zu finden.

1.4 Derzeitige Voraussetzungen und Methoden der Migration der Eisenbahn-LST

Wissenschaftliche und methodische Untersuchungen zum Thema technologischer Systemwechsel und dem damit verbundenen Migrationsprozess wurden bislang in erster Linie im Bereich der Rechnernetzwerke durchgeführt [50]. Dabei ist die Struktur der Problemstellung aufgrund der ähnlich verteilten Systeme – Client / Server einerseits sowie Strecke / Fahrzeug andererseits – auf einer gewissen Ebene vergleichbar (s. dazu auch 1.2).

Die innerhalb der Migration innovativer Technologien in das bestehende betrieblich-technische Eisenbahnumfeld stattfindenden Vorgänge sind gegenwärtig noch nicht vollständig wissenschaftlich erforscht. Im Bereich der LST hat sich in den vergangenen Jahren im Bereich der Signaltechnikindustrie sowie bei den Bahngesellschaften der Trend abgezeichnet, mit der Entwicklung neuer Technologien auch begleitende Migrationsüberlegungen anzustellen. Eine Vorreiterrolle nimmt hier die Entwicklung von ETCS ein. Diese Arbeiten sind bislang jedoch durch die meist eindimensionale Betrachtungsweise charakterisiert. So befassen sich zumeist Eisenbahn-Infrastrukturunternehmen einerseits oder die Technikhersteller andererseits aus ihrer jeweiligen Sichtweise mit der Problemstellung. Dabei fehlt die ganzheitliche wissenschaftliche und systematische Untersuchung bzw. Optimierung entlang der relevanten Bewertungskriterien. Somit weist der aktuelle Stand der Migrationsforschung in der Eisenbahndomäne einen Bedarf nach ganzheitlicher und systematischer Herangehensweise auf.

Daher fokussiert diese Arbeit insbesondere folgende Fragestellungen, für deren Untersuchung insbesondere das neutrale wissenschaftliche Umfeld geeignet ist:

- Wie ist ein Entscheidungsmodell zu gestalten, anhand dessen bestimmt werden kann, ob und welche neue Technologie in ein bestehendes Verkehrssystem eingeführt werden soll?
- Wie können Migrationsprozesse für die LST im System Eisenbahn eindeutig modelliert werden?
- Wie sind Migrationstrategien systematisch zu entwickeln, entlang der relevanten Kriterien zu bewerten und zu simulieren?

In der Bahndomäne sind erste Arbeiten zur Entwicklung von Migrationsstrategien im Schienenverkehr bei der Einführung des ETCS zu finden. Allerdings fällt dabei auf, dass die Arbeiten hierzu meist einzelne Segmente der Migrationsthematik adressieren.

Beispielsweise untersuchen Achatz, Boestfleisch und Krieg [1] sowie Dräger [15] in diesem Kontext die möglichen Migrationsstrategien für den Einsatz von ETCS in Deutschland. Dabei werden sowohl die Hochgeschwindigkeits- als auch die konventionellen Strecken betrachtet.

Winter [63] behandelt in seinem Bericht u. a. die unterschiedlichen ETCS Migrationsstrategien auf den transeuropäischen Korridoren sowie den Einfluss verschiedener ETCS-Level auf die gewählte Strategie.

Mindel, Kollmannsberger et. al. sowie Müller und Althaus dokumentieren eine Auseinandersetzung mit dem Thema ETCS-Migration in Deutschland und der Schweiz, behandeln jedoch technische Aspekte aus der Sicht des Systemherstellers und Technikbetreibers und weniger methodische Herangehensweisen [26] [35] [37].

Die Quellen [32] und [36] thematisieren die Erfahrungen mit der deutschen Pilotanwendung in erster Linie aus technisch-betrieblicher Sicht.

Einige Erfahrungen – auch im Hinblick auf die Kostenbetrachtung – der europäischen Nachbarbahnen mit ETCS-Projekten finden sich in [8] und [59].

Steiner untersucht hingegen für die Migration von Stellwerken in [56] ausgehend vom bestehenden Ausrüstungsstand der Bahn die Einflüsse des raschen technologischen Wandels auf das Systemdesign sowie auf die Produktentwicklung und -pflege. Weitere betrachtete Aspekte sind die Wartung und Instandhaltung sowie das Ersatzteil- und Konfigurations-Management. Für das entwickelte Stufenmodell untersucht er die möglichen Auswirkungen auf Hersteller und Betreiber.

Ein Vorgehen zur Einführung einer systematischen und wissenschaftlichen Migrationsmethodik, insbesondere bei der Bewertung von Migrationsstrategien für die Eisenbahn-LST, findet sich in [9]. Eine kritische Auseinandersetzung mit diesen Ausführungen werden im Abschnitt 4.3 vorgenommen.

Lemmer, Meyer zu Hörste und Schnieder fassen in [30] mögliche Strategien für Systeme der Eisenbahn-LST zusammen. Es werden globale, spezifische und lokale Ansätze zur Migration adressiert und eine betriebliche Bewertung vorgeschlagen, wobei beteiligte Interessengruppen zu berücksichtigen sind. Janhsen, Lemmer, Meyer zu Hörste und Schnieder behandeln in [21] Strategien zu Migration verschiedener ETCS-Level.

Es kann zusammenfassend festgestellt werden, dass im Rahmen von einigen wissenschaftlichen Studien ein erster Beitrag zur ganzheitlichen Betrachtung von Migrationsprozessen im Schienenverkehr geleistet worden ist. Aufgrund der gegebenen Komplexität muss eine weiterführende methodische Erforschung dieses Themenkomplexes stattfinden, um den aktuellen und künftigen Herausforderungen in einem sich immer schneller wandelnden Technologieumfeld effektiv zu begegnen. Gerade in den letzten Jahren – und nicht zuletzt getrieben durch die Notwendigkeit der Entwicklung und Notifizierung nationaler ETCS-Migrationsstrategien in Europa – sind einige wissenschaftliche Ansätze hierzu entstanden.

In [33], [42], [39], [40] und [43] finden sich Ansätze zur ganzheitlich methodischen Behandlung des Themengebiets Systemauswahl, -migration und Migrationsfähigkeit im Rahmen von

Systemwechseln bei der Eisenbahn-LST. Das Ziel ist die mehrdimensionale Betrachtung der Problemstellung und eine breite Anwendbarkeit.

Die Fragestellungen der Migrationsfähigkeit und den Rückschluss auf den Entwicklungsprozess der innovativen technischen Systeme behandelt [38] sowie [6].

In [29] finden sich Untersuchungen zu der Auswahl von Migrationsstrategien unter der Berücksichtigung von betrieblichen, technischen, wirtschaftlichen, volkswirtschaftlichen und politischen Randbedingungen. Die Verbindung zum ganzheitlichen Life-Cycle-Management und insbesondere die Verbindung des Migrationsprozesses mit den Lebenszykluskosten stellt [41] her. [25] befasst sich in ersten Ansätzen mit der Einbindung der Eisenbahnbetriebssimulation in die Bewertung verschiedener Migrationsstrategien.

Entscheidungsprozesse im Rahmen der ETCS-Projekte benötigen aufgrund der Komplexität der Problemstellung eine durchgängige methodische Unterstützung. Auf diese Weise sollen künftige Bausteine der ETCS-Migration durch eine objektive Entscheidungsbasis optimiert werden. Die vorliegende Arbeit fokussiert diesen Aspekt und schließt somit die vorhandene Lücke im vorgestellten wissenschaftlichen Umfeld.

1.5 Struktur der Arbeit

Die vorliegende Arbeit fokussiert nach dem Einleitungsabschnitt und der Beleuchtung der Ausgangssituation hinsichtlich der wissenschaftlichen Voraussetzungen im Thema Migration der Eisenbahn-LST auf die Entwicklung und Beschreibung eines Prozessmodells. Dieses Modell strukturiert die Behandlung der Migrationsfragestellungen und des damit verbundenen Entscheidungsprozesses. Den Kern bildet die durchgängige Methodik für die Entscheidungsunterstützung sowie die schrittweise Abbildung dieser Methodik auf die Migration des europäischen Zugsicherungssystems ETCS (Abbildung 3).

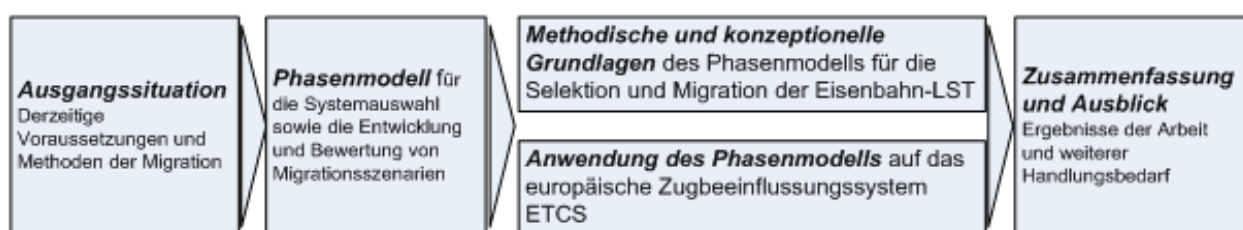


Abbildung 3: Struktur der Arbeit

Die Arbeit wird dabei wie folgt strukturiert:

Im Einleitungskapitel werden die Zielsetzung sowie die dabei angewendete Vorgehensweise erläutert. Die thematische Eingrenzung der Arbeit soll dabei den genauen Gegenstand der

Betrachtung verdeutlichen bzw. die Aspekte nennen, die sich außerhalb des Fokus befinden. Ebenfalls soll hier ein Überblick über den Stand der wissenschaftlichen Ausgangssituation im Thema Migration gegeben werden.

Kapitel 2 beinhaltet die Herleitung des Phasenmodells der Migration sowie die Systembeschreibung ETCS. Das System ETCS wird dabei mit seinen Bestandteilen, Schnittstellen sowie den grundlegenden Aspekten der Entwicklungsmotivation dargestellt. Ein Exkurs zur Sichtweise auf ETCS in Deutschland rundet dieses Kapitel ab. Am Ende des Kapitels 2 ist die grundsätzliche Struktur der Problemstellung Migration bekannt und der Überblick über die hier entwickelte Methodik für die Behandlung von Migrationsprozessen gegeben. Das Anwendungssystem ETCS ist in seinen relevanten Eigenschaften vorgestellt.

Die nachfolgenden Abschnitte gliedern sich konsequent entlang der einzelnen Schritte im Phasenmodell bzw. im darin verknüpften Entscheidungsprozess. Für dieses Modell wird eine Methodik für die Entscheidungsunterstützung schrittweise entwickelt und beispielhaft auf ETCS angewendet.

Im Kapitel 3 wird der methodische Schritt der Systemvorauswahl beschrieben. Auf Basis der Beschreibung einzelner Methoden für die Bewertung und Selektion von technischen Systemen findet hier die Auswahl einer geeigneten Methode statt. Anschließend werden die relevanten Randbedingungen im Umfeld der ETCS-Migration beleuchtet. Als Ergebnis aus diesem Kapitel ist das methodische Umfeld für den Schritt der System-Vorselektion bekannt und die Randbedingungen für diesen Schritt bei der ETCS-Einführung beschrieben.

Eine für das wissenschaftliche Umfeld erstmalige Einordnung der Migrationsfragestellung und insbesondere der Entwicklung von ETCS-Migrationsstrategien in die drei typischen Ebenen der Planungsprozesse

- strategisch
- taktisch
- operativ

wird im Kapitel 4 behandelt. Dabei werden die Einflussfaktoren der jeweiligen Ebenen diskutiert und die Basisstrategien für die hier fokussierten Ebenen – operativ und taktisch – vorgestellt. Im Bereich der strategischen Ebene findet hier eine kritische Auseinandersetzung mit den netzwerkökonomischen Aspekten der ETCS-Migration statt.

Am Ende des Kapitels sind die verschiedenen Ebenen der ETCS-Migration dargestellt und in die drei oben genannten Phasen strukturiert. Diese Struktur bietet die Basis für die Fokussierung der in den Kapiteln 5 und 6 durchgeführten Anwendung / Fallstudie. Für die operative Ebene sind die Basisstrategien erläutert.

Die im Rahmen des Kapitels 4 entwickelten Migrationsstrategien werden im Kapitel 5 bewertet. Dafür wird zunächst eine Einordnung von Migrationsprojekten in das betriebswirtschaftliche Umfeld vorgenommen. Es folgt die Herleitung der Berechnungsvorschrift für die in diesem Schritt relevanten Kennzahlen. Die Bewertung der Migrationsstrategien wird unter Anwendung eines Software-Werkzeugs teilautomatisiert, das auf Basis der oben genannten Berechnungsvorschriften und der daraus hergeleiteten Algorithmen entwickelt wurde. Die Grundzüge dieser Softwareanwendung werden hier vorgestellt. Abschließend findet in Form einer Fallstudie die Anwendung der Methodik auf einen fiktiven ETCS-Korridor statt.

Das Ergebnis ist die Berechnungsvorschrift für die Bewertung der Kennzahlen Migrationsdauer und Migrationskosten. Ein erster Teil der Fallstudie demonstriert die Anwendung der entsprechenden methodischen Schritte und die Berechnung der oben genannten Kennzahlen für einen Beispielkorridor.

Der letzte methodische Schritt der Systemauswahl wird im Kapitel 6 behandelt. Die im Kapitel 3 für die Systemvorauswahl identifizierte Methode wird hier vollständig in Form einer ETCS-Fallstudie angewendet, so dass mit diesem Kapitel sowohl die Vorstellung der Methodik wie auch ihre Anwendung abgeschlossen werden.

Für die im Rahmen der Fallstudie definierten Randbedingungen und Entscheidungspräferenzen wird eine Handlungsempfehlung für das optimale Zielsystem und die dazugehörige Migrationsstrategie erarbeitet und formuliert.

Das abschließende Kapitel 7 fasst die erzielten Ergebnisse zusammen und gibt einen Ausblick auf die anstehenden Themen und Arbeiten im Umfeld der Migration der Eisenbahn-LST. Es handelt sich hierbei entweder um Themen, in denen auf Basis dieser Dissertation weiterführende Untersuchungen eingeleitet werden können, oder um Fragestellungen, die im Rahmen der Forschungsarbeit des Instituts für Verkehrssystemtechnik behandelt werden, in dieser Arbeit jedoch keine Berücksichtigung gefunden haben.

Das einheitliche europäische Zugsicherungssystem ETCS wird momentan kontrovers diskutiert. Die Migration befindet sich in einem Spannungsfeld zwischen den Vorgaben der Europäischen Union, der Umsetzungspläne der Mitgliedsstaaten, der Technologieroadmaps der Industrie und der betriebswirtschaftlichen Entscheidungen einzelner Bahngesellschaften.

Trotz der Vielfalt an unterschiedlichen und zum Teil heterogenen Interessen, ist die künftige Entwicklung grundsätzlich beschlossen. ETCS wird sukzessive eingeführt und somit einen Beitrag zur Veränderung des europäischen Bahnsektors leisten.

Diese Arbeit wird zeigen, was die Hintergründe dieser Entwicklung sind und vor allem wird sie einen Ansatz darstellen, wie der Migrationsprozess optimiert und die damit verbundenen komplexen Entscheidungen systematisch und objektiv getroffen werden können. Unter der Beachtung der technisch-betrieblichen Randbedingung können damit die finanzielle Mehrbelastung sowie die betrieblichen Einschränkung minimiert werden.

2 Phasenmodell für die Migration der Eisenbahnleit- und -sicherungstechnik

2.1 Modellbegriff

Der Begriff ist aus dem lateinischen „Modulus“ bzw. dem italienischen „Modello“ entstanden und diente als Bezeichnung für „Muster“, „Vorlage“ oder „Maß“. Der Begriff wurde in erster Linie in der Architektur und Kunst verwendet [24].

Mittlerweile erstreckt sich der Gebrauch des Begriffes auf viele weitere Felder, wie beispielsweise auf mathematische Modelle aus der Physik oder Verhaltensmodelle in der Psychologie. Die Verwendung geht hin bis zu den Software- und Systemmodellen aus den Ingenieurwissenschaften und der Informatik.

Dabei sind allen Modellen folgende drei Merkmale gemein [24]:

Abbildung: Ein Modell ist stets die Repräsentation eines wie auch immer gearteten Originals (das wiederum ein Modell sein kann).

Verkürzung: Ein Modell gibt nicht alle Eigenschaften des Originals wieder, sondern nur die, die dem Modellierer oder Modellbenutzer relevant erscheinen.

Pragmatik: Modelle ersetzen das Original für bestimmte Nutzer, für ein bestimmtes Zeitintervall und für bestimmte Operationen oder Handlungen. Ein Modell ist also nur unter bestimmten Randbedingungen anwendbar. Bei der Verwendung eines Modells muss daher sorgfältig geprüft werden, ob es für den jeweiligen Einsatz geeignet ist oder ob der Gültigkeitsbereich des Modells bereits verlassen wurde.

Die Einsatzgebiete von Modellen variieren mit ihrer Pragmatik, können aber in vier Gruppen aufgeteilt werden:

- Funktionsersatz, -erweiterung oder -verstärkung (z. B. Regler)
- Verhaltensregulation (z. B. Training in einem Flugsimulator)
- Erkenntnisgewinn (z. B. Klimarechenmodelle)
- Kenntnisvermittlung und -speicherung (z. B. anatomische Bildtafeln in der Medizin)

Entsprechend dieser Gruppen können Modelle unterschiedlichen Zwecken dienen. Bamberg / Coenenberg [4] unterscheiden im Kontext der Betriebswirtschaftslehre zwischen Beschreibungs-, Erklärungs- (bzw. Prognose-) sowie Entscheidungsmodellen. Dabei können Beschreibungs- und Erklärungsmodelle als Voraussetzung für die praktische Anwendung von Entscheidungsmodellen angesehen werden. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird vom Phasenmodell für den Migrationsprozess der Eisenbahn-LST gesprochen, welches – mit einer Methodik unterlegt – als Entscheidungsmodell in der Planungsphase der Migrationsvorhaben definiert werden kann.

2.2 Prozessdarstellung der Migration

Der Systemmigration wird – wie oben bereits diskutiert – insbesondere im Umfeld der IT-Architektur hohe Bedeutung beigemessen. Dort wird im Zusammenhang mit einer neuen IuK-Infrastruktur auch der dazugehörige Migrationsweg beachtet. Der Systemmigration kommen hier folgende Aufgaben zu [4][5]:

- Bereitstellung geeigneter IuK-Infrastruktur
- Überführung von Altsystemen auf die neue IuK-Infrastruktur unter Erhalt getätigter Investitionen
- Gestaltung neuer IuK-Systeme, welche die Anforderungen an Kundenorientierung und Flexibilität bestmöglich erfüllen

Im Folgenden soll die Struktur der Migrationsprozesse bei einer Systemeinführung in der Bahndomäne dargestellt werden. Dabei gliedert sich das Strukturmodell – in Anlehnung an das o. g. Vorgehen in der IT-Domäne – grundsätzlich in den Teilprozess der Selektion des Zielzustands einerseits und den Teilprozess der Migration im engeren Sinn andererseits.

Ausgehend von einer gegebenen aktuellen technisch-betrieblichen Konfiguration wird zunächst der Treiber bzw. die Motivation analysiert, einen Systemwechsel zu vollziehen und somit einen Migrationsprozess einzuleiten. Diese Motivation, bzw. die mit dem Technologiewechsel verbundene Zielsetzung kann unterschiedlicher Art sein:

- Erhöhung der Wirtschaftlichkeit / Rationalisierung
 - Produktivitätsgewinn
 - Kostenminimierung
- Notwendigkeit der Verbesserung der betrieblichen Leistungsfähigkeit
- Funktionserweiterung
- Vereinheitlichung von Systemkomponenten zwecks effizienterer Wartung, Instandhaltung und Beschaffung
- Technologiegetriebene Migration
 - Fehlende Lieferfähigkeit des aktuellen Systems bzw. einzelner Systemkomponenten durch die Abkündigungen auf dem Beschaffungsmarkt bei gleichzeitigem Bedarf einer Ersatzinvestition
 - das Ende des technischen oder betriebswirtschaftlichen Lebenszyklus der alten Anlage
 - das Ende der Wartungs- und Serviceunterstützung der alten Anlage
 - Marktreife von technologischen Innovationen auf System- oder Komponentenebene
- Politische Entscheidung / legislative Vorgabe
- Etc.

Eine Kombination einzelner Aspekte ist dabei ebenfalls ein denkbare Szenario.

Logischer Ablauf der Methodik für die Entscheidungsvorbereitung

Die Art der Motivation, ein neues (technisches) System einzuführen, wird für die Zusammenstellung der Bewertungskriterien während der Selektion entscheidend sein. Auf der aktuellen Situation und der Migrationsmotivation aufbauend soll anschließend das für den konkreten Anwendungsfall geeignete Ziel der Migration identifiziert werden. Es wird somit nach der optimalen Lösung, dem optimalen Zielsystem bzw. einer begrenzten Auswahl an sehr guten Zielsystemen gesucht.

Im zweiten Teilprozess – der Migration im engeren Sinn – wird der optimale Weg von dem aktuellen zu dem identifizierten Zielzustand gesucht. Durch den Vorgang der Migration im engeren Sinn soll daher der zuvor ermittelte Zielzustand erreicht werden. Hier findet also unter bestimmten Randbedingungen und Einflussfaktoren der o. g. Systemwechsel statt.

Eine besondere Herausforderung innerhalb dieses Prozessablaufs ist die Tatsache, dass die Migrationsfähigkeit und der damit verbundene Migrationsaufwand (in Zeit und Geld) eines potentiellen Zielsystems die Systemauswahl maßgeblich beeinflussen kann. So ist denkbar, dass durch die Betrachtung der Migration festgestellt wird, dass ein nach der Selektion als vorteilhaft eingestuftes System aufgrund eines hohen Migrationsaufwands keine gute Lösung des Gesamtproblems darstellt. Da die Kenngrößen Migrationskosten und Migrationsdauer erst im zweiten Teilprozess analysiert und ermittelt werden, findet an dieser Stelle eine Rückkopplung statt, welche durch die Methodik beherrscht werden muss (Abbildung 4).

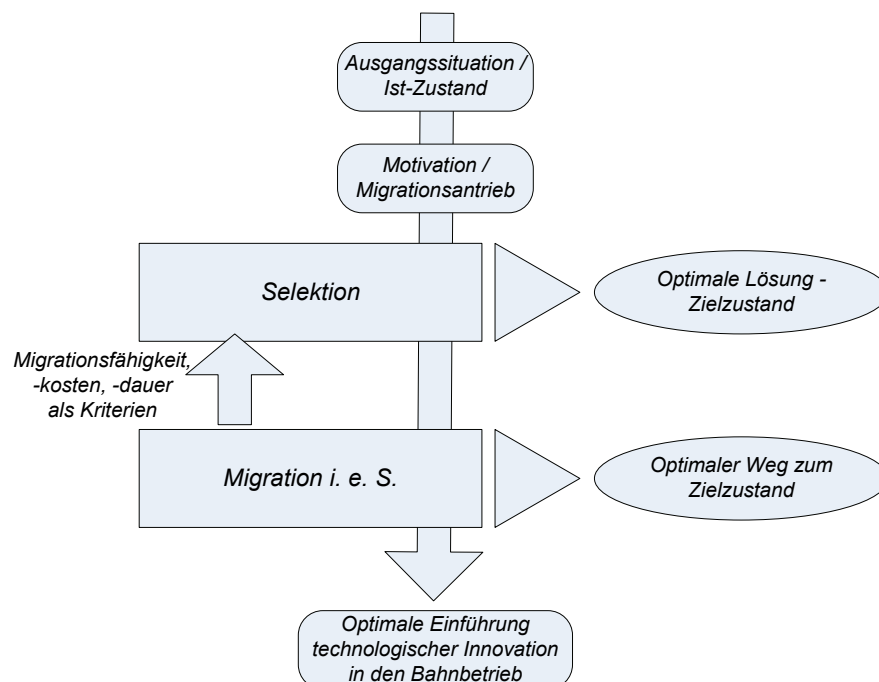


Abbildung 4: Überblick über den Migrationsprozess für die LST in der Bahndomäne

Eine Möglichkeit, den gesamten Migrationsprozess hinsichtlich seines logischen Ablaufs zu strukturieren, sind also die folgenden zwei Teilprozesse:

- Entscheidung über die Auswahl eines Zielsystems und die dazugehörige Migrationsstrategie
- Systemübergang vom aktuellen Zustand in den Zielzustand – Migration im engeren Sinn

Um eine höhere Detaillierung zu erreichen und somit den Prozess genauer abzubilden, können die beiden Teilprozesse in insgesamt vier Phasen unterteilt werden (Abbildung 5):

- Beschreibung der Systemstruktur und der Systemeigenschaften (Systembeschreibung)
- Systemselektion
- Entwicklung von Migrationsstrategien

Bewertung von Migrationsstrategien und Identifikation der geeigneten Lösung

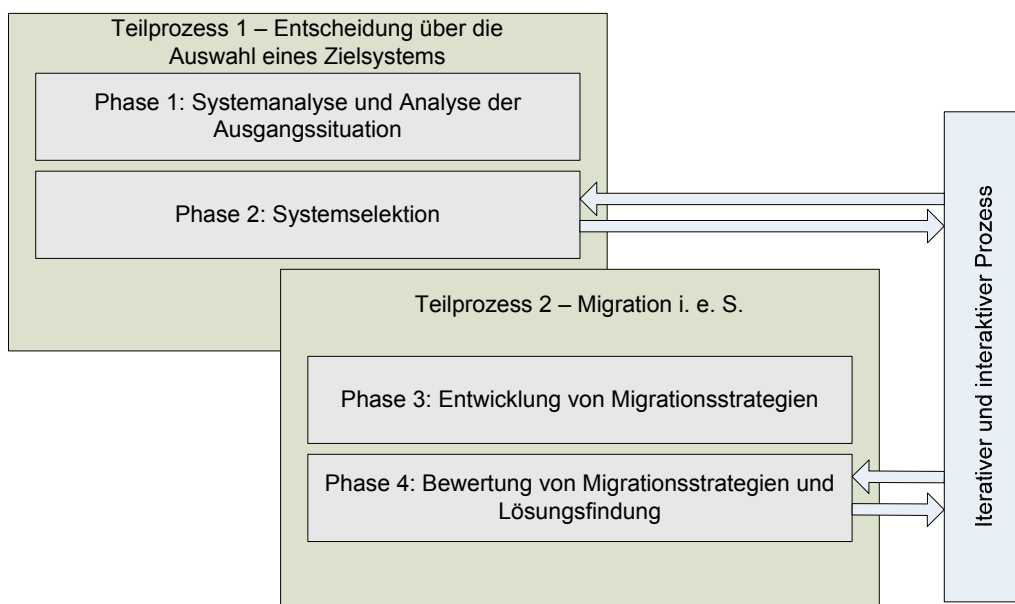


Abbildung 5: Einteilung der Strukturbestandteile der Migrationsprozesse

Während der ersten beiden Phasen (Systembeschreibung und Systemselektion) werden die möglichen Zielsysteme beschrieben und anhand relevanter Bewertungskriterien ausgewählt. Die Systembeschreibung bzw. -modellierung dient dabei sowohl als Basis für die Ermittlung von Kennzahlen wie LCC, als auch für die Identifikation der Differenzen zum aktuellen System hinsichtlich der Komponenten und Funktionen und somit auch der Maßnahmen, die innerhalb der Migration eingeleitet und durchgeführt werden müssen. Die beiden anschließenden Phasen – Entwicklung und Bewertung von Migrationsstrategien – beschreiben die Migration im engeren Sinne. Hier werden mögliche Migrationsstrategien unter Beachtung relevanter Randbedingungen und Einflussfaktoren für das ausgewählte technische System entwickelt und bewertet. Kosten und Zeit stellen dabei häufig die wesentlichen Bewertungskriterien dar. Aufgrund der Unsicherheit hinsichtlich der künftigen Entwicklung bestimmter relevanter Parameter, wird zusätzlich die Sensitivität der o. g. Kenngrößen untersucht. Als Ergebnis des Phasenmodells liegt ein integrationsfähiges technisches System einschließlich einer optimalen Migrationsstrategie vor.

Zeitlicher Ablauf der Methodik für die Entscheidungsvorbereitung

Ausgehend von diesem 4-stufigen logischen Ablauf eines Systemwechsels wird hier eine Methodik für die Entscheidungsvorbereitung hinsichtlich der o. g. Selektion und der Migration i. e. S. entwickelt. Die dabei entworfene Methodik besteht aus sechs Schritten und kombiniert einzelne methodische Bausteine aus den Ingenieurs- und Wirtschaftswissenschaften zu einem durchgängigen Vorgehen für die Behandlung von Migrationsfragestellungen für die LST in der Bahndomäne.

Da Parameter wie Migrationskosten oder die Migrationsdauer als Bewertungskriterien innerhalb der Systemselektion angewendet werden, muss – wie oben bereits erwähnt – eine Rückführung der Ergebnisse aus der Phase 4 in die Phase 2 gewährleistet sein. Somit entsteht in unserem logischen Modell eine Iterationsschleife, die sich in der Methodik, die einen rückkopplungsfreien zeitlichen Ablauf der Entscheidungsvorbereitung wiedergibt, in einer höheren Detaillierung (sechs Schritte statt vier Phasen) niederschlägt.

Dies bedeutet konkret, dass für eine begrenzte Anzahl an Systemalternativen die Berechnung der Kenngrößen Migrationskosten und Migrationsdauer durchgeführt wird und die Ergebnisse in die Systemselektion integriert werden. Dazu ist eine Teilautomatisierung in der Bewertung notwendig, um den Berechnungsprozess zu vereinfachen und zeitlich effizienter zu gestalten. Das dafür entwickelte Software-Werkzeug ist im Abschnitt 5 beschrieben. Die Identifikation von zulässigen und möglichen Systemen wird durch eine Vorselektion vorgenommen, in der lediglich die Ausschlusskriterien für die Systembewertung angewendet werden.

Daraus ergibt sich der folgende Ablauf der Methodik (Abbildung 6):

1. Systembeschreibung
2. System-Vorselektion
3. Entwicklung von Migrationsstrategien
4. a) Bewertung von Migrationsstrategien
b) Ermittlung der Sensitivität von Kennzahlen
5. Systemselektion
6. Darstellung des Lösungsportfolios

Diese einzelnen Schritte werden in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

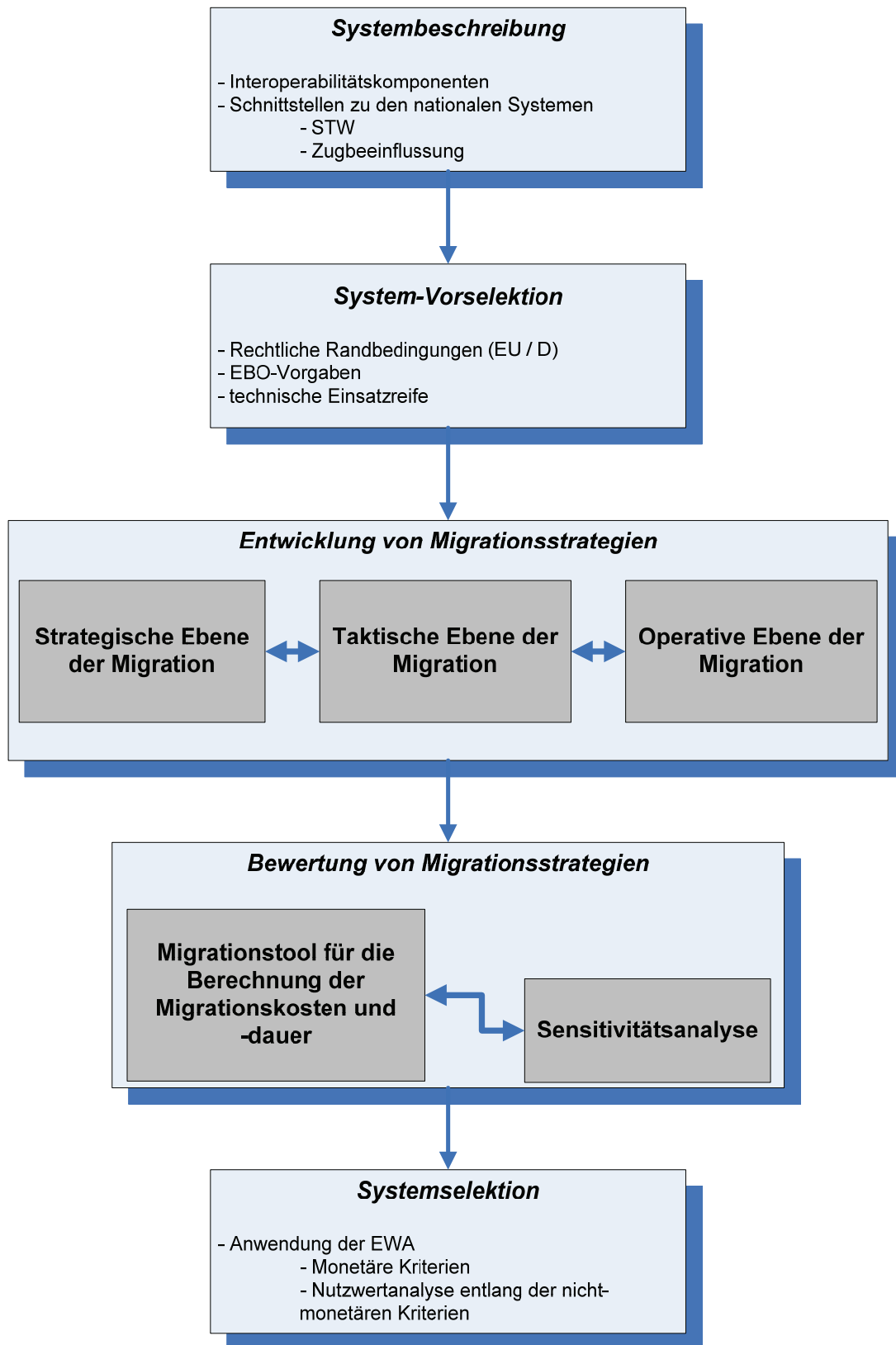


Abbildung 6: Gesamtmethodik für die Entscheidungsunterstützung in Migrationsprozessen

2.3 Systembeschreibung

Im ersten Schritt wird die Menge an möglichen Zielsystemen festgelegt und beschrieben bzw. modelliert. Die Modellierung der Systemstruktur dient als Basis für

1. die Ermittlung relevanter Parameter für die Definition einer Reihe an Bewertungskriterien für die Selektionsphase
 - betriebliche Leistungsfähigkeit
 - Lebenszykluskosten (LCC)
 - etc.
2. den Vergleich zwischen der Zielalternative und dem Ausgangssystem, so dass Migrationsmaßnahmen generiert werden können
 - welche Systemkomponenten müssen ersetzt werden?
 - besteht eine Schnittstellenkompatibilität?
 - wie ist die Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems während der Migration zu erreichen?

Für den Umfang der im Modell dargestellten Systemeigenschaften (Verkürzung, Pragmatik, s. Abschnitt 2.1) ist die Analyse der Anforderungen des jeweiligen Entscheiders an das System ein wichtiger Bestandteil. Als Entscheider können hier verschiedene Instanzen oder Personengruppen definiert werden:

- Eisenbahnverkehrsunternehmen EVU
- Eisenbahninfrastrukturunternehmen EIU
- Nationale und internationale politische Instanzen
 - als Subventionsgeber
 - als Gesetzgeber
 - als Leistungsnachfrager
- Zulassungsgremien und -ämter
- Nutzer des Systems Bahn als Endkunden – Personen, Logistikunternehmen oder die Industrie

Die Systembeschreibung ist keine originäre Migrationsfragestellung, so dass in diesem Rahmen keine weiteren Ausführungen hierzu erfolgen. Vielmehr können unterschiedliche Formen der Systemspezifikation für die weiteren Schritte im Migrationsprozess verwendet werden. Die Systembeschreibung der aktuell in Deutschland eingesetzten Systeme PZB (Punktförmige Zugbeeinflussung) und LZB (Linienförmige Zugbeeinflussung) können z. B. [44] entnommen werden. Im folgenden Abschnitt wird ein kurzer Überblick der technischen Eigenschaften von ETCS gegeben.

2.4 European Train Control System (ETCS)

Die grundlegende Motivation zur Entwicklung und Implementierung des Systems besteht darin, die fragmentierte und historisch gewachsene Landschaft von verschiedenen Zugsicherungssystemen in Europa durch ein einheitliches und in definierten Grenzen und Abstufungen skalierbares System zu ersetzen. Hierbei stehen in erster Linie folgende Aspekte im Vordergrund, die als Ziele und erwartete Vorteile formuliert werden können [34]:

- Interoperabilität der Triebfahrzeuge durch eine europäisch standardisierte Zugsicherung, daraus folgt:
 - flexiblerer Einsatz der Triebfahrzeuge und Triebfahrzeugführer
 - Senkung des Schulungsaufwands
 - kürzere Aufenthaltszeiten an den Grenzen durch das Wegfallen der Triebfahrzeugwechsel
- Erhöhung des Wettbewerbs innerhalb der europäischen Signalbauindustrie und die damit einhergehende Kostensenkung
 - größere Stückzahlen führen zu geringeren Stück- sowie Produktpflegekosten
 - europaweiter Wettbewerb (mit Absatzmärkten auch außerhalb Europas) durch den europäischen Standard
- Standardisierung der unterschiedlichen Lichtsignale durch eine einheitliche Führerstandssignalisierung
- Langfristige Vereinheitlichung der Sicherheitsregeln und des Sicherheitsniveaus
- Langfristige Senkung von Investitionsbedarfen sowie von Instandhaltungsaufwänden
- Vereinheitlichung der betrieblichen Regeln

Insbesondere im Bezug auf den letzten Punkt lässt sich feststellen, dass ETCS eine technische Interoperabilität insbesondere hinsichtlich der technischen Einrichtungen, dazugehörigen Schnittstellen sowie der Kommunikationsprotokolle sicherstellt. Die betriebliche Interoperabilität beinhaltet darüber hinaus auch die noch nicht realisierte Vereinheitlichung der Betriebsordnungen.

Komponenten des ETCS

Durch die tendenzielle Verlagerung der Systemintelligenz auf das Fahrzeug, kann bei dem On-Board Gerät (EVC – European Vital Computer) als Kern des Systems gesprochen werden. Der EVC hat folgende Aufgaben zu erfüllen [34]:

- die Geschwindigkeit des Zuges überwachen
- den Endpunkt der aktuellen Fahrerlaubnis sichern und
- das rechtzeitige Auslösen des Bremsvorgangs sicherstellen

Die dafür benötigten Informationen werden seitens der streckenseitigen Komponenten an die On-Board Unit übertragen.

Diese streckenseitigen Komponenten werden im Folgenden beschrieben.

Die *Euro-Balise* (*Balise*) ist ein passiver Transponder, der bei der Überfahrt durch den Zug angeregt wird und Nachrichten an den Zug sendet. Es können grundsätzlich zwei Typen von Balisen unterschieden werden:

- Balisen, die einen festen Datensatz übertragen (Festdatenbalisen) und
- Balisen, die an ein streckenseitiges Signal bzw. die Signalansteuerung des Stellwerks gekoppelt sind und somit in Abhängigkeit vom Signalbegriff unterschiedliche Datensätze übertragen können (Transparentbalise / schaltbare Balise)

Fahrzeugseitig wird die jeweilige Information durch das BTM (Balise Transmission Module) empfangen.

Die Komponente für die Funkübertragung wird *Euro-Radio* genannt. Diese Komponente kann in Abhängigkeit der ETCS-Ausrüstungsstufe sowohl als Infill (Signalaufwertung zwecks Kapazitätserhöhung) oder als reguläres Medium zur Übertragung der Fahrerlaubnis bzw. allgemein von Streckeninformationen verwendet werden. Die dabei eingesetzte Technologie ist GSM-R (Global Standard for Mobile Communication – Railway), wobei für Eisenbahnanwendungen sichere Protokolle eingesetzt werden. Die Sende- und Empfangseinrichtung im Zug wird im Level 1 RIU (Radio Infill Unit) und in den Ausrüstungsstufen 2 und 3 RTM (Radio Transmission Module) genannt.

Analog zu der o. g. Infill-Option mit Hilfe der Funkübertragung, wurde unter der Bezeichnung *Euro-Loop* eine Linienleiterschleife entwickelt, die im Level 1 im Vorfeld der Signalbalise eine Aufwertung mittels kontinuierlicher Datenübertragung realisiert.

Eine weitere streckenseitige Komponente ist die *LEU* (Lineside Electronic Unit). Diese Einheit dient als Verbindung zwischen einem Signal und einer schaltbaren Balise und übersetzt somit die von Stellwerk generierten Signalbegriffe in Balisentelegramme.

Das *RBC* (Radio Block Centre) ist in den Ausrüstungsstufen 2 und 3 für die Vergabe der Fahrerlaubnis zuständig. Das RBC befindet sich zentral an der Strecke und besitzt einerseits eine Schnittstelle zum Stellwerk, andererseits benutzt es das GSM-R Netz für die Übertragung der Informationen an den Zug.

Für die Migrationsphase von den nationalen Systemen zu ETCS wurde eine zusätzliche fahrzeugseitige Komponente definiert. Dies sind die STM-Einheiten (Specific Transmission Module), die für einzelne nationale Zugsicherungssysteme zu entwickeln sind. STM übersetzt die streckenseitige Information des nationalen Systems in die vom EVC geforderten Daten. Somit können die bereits mit ETCS ausgerüsteten Züge über die noch nationalen Streckenabschnitte verkehren.

Ausrüstungslevel / Ausrüstungsstandards des ETCS

ETCS umfasst drei zentrale technische Ausrüstungslevel [34], die als ETCS Level 1 bis 3 bezeichnet werden. Zusätzlich wird die Fahrt in nicht ausgerüsteten Bereichen als Level 0 und der Betrieb mit STM auf einer nationalen streckenseitigen Ausrüstung als Level STM bezeichnet. Als Zusatz zu der aktuellen Spezifikation SRS 2.3.0 und als Bestandteil der künftigen Spezifikation SRS 3.0.0 wird schließlich noch ETCS Level 1 Limited Supervision (LS) definiert. Im Folgenden werden einzelne Level 1 bis 3 sowie LS kurz skizziert.

Beim *Level 1* ist die Strecke mit der konventionellen Signalisierung ausgestattet, die der Triebfahrzeugführer beachten muss. Im Gleisbett liegende Balisen übertragen Streckendaten und dynamische Signalinformationen an den Zug. Der Abgriff der Signalinformationen und die Generierung der ETCS-Telegramme werden durch die LEU realisiert. Optional ist zu Infill-Zwecken neben der Projektierung weiterer Infill-Balisen auch eine Erweiterung durch semi-kontinuierliche Medien wie Euro-Loop oder Euro-Radio möglich. Die streckenseitigen Gleisfreimeldeeinrichtungen (GFM) dienen weiterhin für die Belegt- und Freimeldung einzelner Streckenabschnitte sowie zur diskreten Zugortung. Die Zugfolge wird durch herkömmliche Stellwerkstechnik gesichert. Im ursprünglich spezifizierten Modus Full Supervision werden die Zuggeschwindigkeit und die sich aus den Strecken- und Fahrzeugdaten ergebende Bremskurve kontinuierlich überwacht.

ETCS Level 1 Limited Supervision wird nach dem derzeitigen Stand der Entwicklung im Rahmen der SRS 3.0.0 spezifiziert sein. Es handelt sich hierbei um eine weitere Ausrüstungsstufe, die eine Weiterverwendung der bestehenden Signalisierung sowie der nationalen Betriebsregeln impliziert. Somit kann durch LS lediglich die technische Interoperabilität gewährleistet werden. In dieser Ausrüstungsvariante werden nur Streckenabschnitte mit einem hohen Gefährdungspotential kontinuierlich überwacht. Das System ist skalierbar hinsichtlich der Intensität der Überwachung und kann somit wie das jeweilige nationale Zugsicherungssystem parametrisiert werden. Die Infrastrukturbetreiber erwarten hierbei eine kostengünstige Lösung, da die Projektierungs- sowie Hardware-Kosten im investiven Bereich niedriger als für Level 1 erwartet werden. Zusätzlich können bestehende Signalisierungssysteme und somit auch die Stellwerkstechnik weiter verwendet werden.

ETCS Level 2 kann ohne bzw. mit eingeschränkter streckenseitiger Signalisierung ausgeführt werden. Das RBC erteilt die Fahrterlaubnis, den Zielpunkt, die zulässige Geschwindigkeit etc. über GSM-R an den Zug. Die Information wird mittels Führerstandssignalisierung visualisiert. Festdatenbalisen werden nur noch für die Übertragung von Ortungsinformationen eingesetzt. Streckenseitige Gleisfreimeldeeinrichtungen sind weiterhin vorhanden. Die Sicherung der Zugfolge erfolgt seitens der Stellwerkstechnik im festen Blockabstand. Der Einsatz von ETCS Level 2 setzt aufgrund der Schnittstelle zwischen RBC und Stellwerk in der Regel einen Einsatz elektronischer Stellwerke voraus.

Im ETCS Level 3 wird zusätzlich zu dem Verzicht auf die streckenseitige Signalisierung auch die Information über die Position des Zugs sowie seine Vollständigkeit fahrzeugseitig generiert. Festdatenbalisen dienen weiterhin als „Kilometersteine“ und die streckenseitigen Gleisfreimeldeeinrichtungen sind nicht mehr notwendig. Aufgrund der kontinuierlichen Zugortung und Vollständigkeitsprüfung ist das Fahren im absoluten oder relativen Bremswegabstand (Moving Block) technisch realisierbar. Die Funktionsallokation zwischen RBC und Stellwerk verlagert hier ein Großteil der Aufgaben zur Fahrzeug- und Streckensicherung auf das ETCS.

Die Tabelle 1 (s. auch [34] in ähnlicher Darstellung) zeigt eine vergleichende Gegenüberstellung verschiedener ETCS-Stufen.

Level	0	1		LS	2		3	STM
Technische Interoperabilität	bedingt	ja		ja	ja		ja	bedingt
Betriebliche Interoperabilität	nein	bedingt		nein	bedingt	ja	ja	bedingt
Signalisierung	Strecke	Strecke / DMI		Strecke	Strecke	DMI	DMI	Strecke
Infill	nein	nein	ja	bedingt	nein		nein	nein
Technologien zur Datenübertragung	Balise*	Balise	Balise, Loop, Funk	Balise	Funk		Funk	national / Balise*
Funkabdeckung	nein	nein	lokal	nein	global		global	nein
RBC	nein	nein		nein	ja		ja	nein
Zugvollständigkeitsüberwachung	Strecke	Strecke		Strecke	Strecke		Fahrzeug	Strecke
Hochleistungsblock	nein	nein		nein	ja		ja	nein
Moving Block	nein	nein		nein	nein		ja	nein
GFM	Strecke	Strecke		Strecke	Strecke		Fahrzeug	Strecke
Fixdatenbalise	ja*	ja		ja	ja		ja	ja*
Transparente Balise	nein	ja		ja	nein		nein	nein
Notwendigkeit der ESTW-Technik	nein	nein		nein	i. d. R. ja		ja	nein

*Balise zur Ankündigung des Moduswechsels

Tabelle 1: Vergleich der verschiedenen ETCS-Level

Relevante Schnittstellen

Für die Entwicklung von Migrationsstrategien für ein verteiltes Zugsicherungssystem sind die Schnittstellen zum Stellwerk sowie die Aspekte der Kompatibilität zu den vorhandenen nationalen Systemen von essentieller Bedeutung. Bezüglich der Schnittstellen zwischen Zugbeeinflussungssystemen und Stellwerken kann vereinfacht von folgenden Eigenschaften ausgegangen werden:

- Punktförmig wirkende Systeme (PZB, ETCS Level 1, ETCS Level 1 LS) – einfache Schnittstellen nahe der physikalischen Ebene des ISO/OSI-Modells

- Kontinuierlich wirkende Systeme (LZB, ETCS Level 2, etc.) – intelligente Schnittstellen entlang des gesamten ISO/OSI-Modells

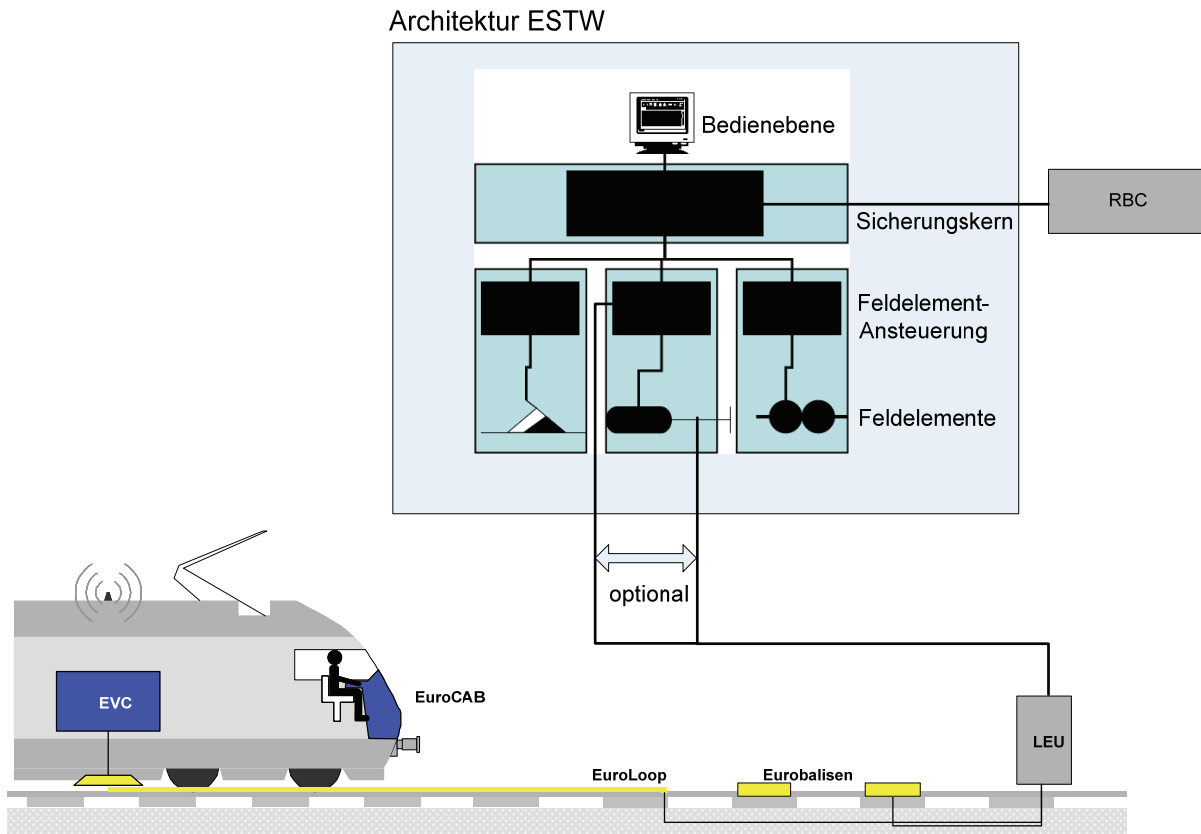


Abbildung 7: Schnittstellen der ETCS-Komponenten zum Stellwerk (vereinfachte Darstellung)

Die Schnittstellen zwischen ETCS und dem Stellwerk werden in Abhängigkeit von der Ausrüstungsstufe entweder von der

- LEU (Level 1, Level 1 LS), oder dem
- RBC (Level 2 und Level 3)

realisiert (Abbildung 7).

Dabei kann die LEU entweder durch die Lampenströme der sich im Feld befindlichen Signale die Informationen über die Signalbegriffe empfangen oder optional direkt an die Stellteile (Ansteuermodule der Feldelemente) angeschlossen werden. Im ersten Fall ist lediglich das Vorhandensein der Lichtsignale als Voraussetzung anzusehen – die Stellwerksbauform (ESTW oder RSTW) ist hier nicht relevant. Für die hier genannte Alternativoption ist ein ESTW als Voraussetzung anzusehen. Grundsätzlich ist aber festzustellen, dass für die Ausrüstungsformen Level 1 und LS keine STW-Anpassung bzw. ESTW-Investition als notwendige Bedingung anzusehen ist (s. dazu auch Tabelle 1).

Das RBC andererseits ist direkt an den Sicherungskern eines STW gekoppelt. Diese Schnittstelle ist lediglich in Verbindung mit einem elektronischen Stellwerk oder einer Fernsteuerung definiert (Tabelle 1).

Der zweite Aspekt – die Kompatibilität zu den nationalen Systemen – ist in der Abbildung 8 dargestellt. Die grundlegende Komplexität bei den Migrationsfragestellungen kommt dabei durch die Systemverteilung auf die Strecke einerseits und die Fahrzeuge andererseits zustande.

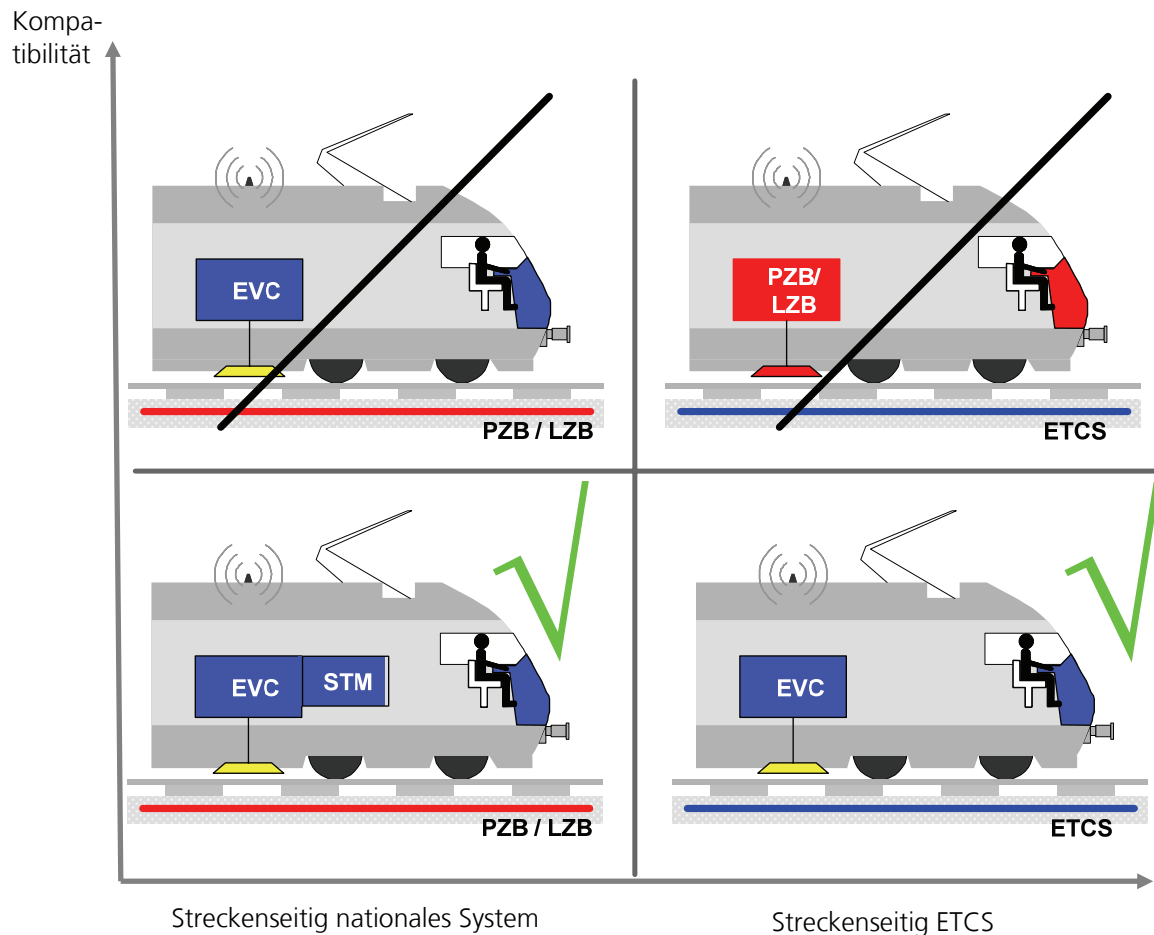


Abbildung 8: Kompatibilitätsbeziehungen zwischen ETCS und PZB/LZB

Möchte ein Verkehrsunternehmen mit ETCS-Fahrzeugen Verkehr durchführen und somit an den angestrebten Vorteilen partizipieren, muss entweder

- die Strecke ebenfalls mit ETCS ausgerüstet sein, oder
- fahrzeugseitig das entsprechende STM installiert sein.

Im Falle einer streckenseitigen ETCS-Ausrüstung haben Fahrzeuge mit dem nationalen System keinen Zugang zu den entsprechenden Netzabschnitten. Dieses Kompatibilitätsproblem kann in Form einer Parallelausrüstung strecken- und / oder fahrzeugseitig gelöst werden. Dies ist auch die Basis für die Entwicklung von Migrationsstrategien (auf operativer Ebene der Migration), die in den folgenden Abschnitten dieser Arbeit erläutert und diskutiert werden.

Eine weitere Migrationsvariante ist das „Schweizer Modell“, das invers zu dem o. g. STM funktioniert. Hierbei erhalten die mit dem nationalen System ausgerüsteten Fahrzeuge das so

genannte Eurobalise Transmission Module (ETM), so dass sie auf den bereits auf ETCS umgerüsteten Strecken verkehren können. Diese Strategie wird im Abschnitt 4.3 näher vorgestellt.

DB-Strategie

Die ETCS Strategie der DB Netz AG umfasst im Wesentlichen folgende Bausteine

- europäisch notifizierte Korridore des konventionellen Bahnsystems
- Hochgeschwindigkeitsstrecken im transeuropäischen Netz
- Neu- und Ausbaustrecken
- LZB-Ablösung ab 2020
- Lückenschlüsse

Dabei ist die Ausrüstungsstrategie für die HGV-Strecken auf Grund der zulässigen Geschwindigkeit auf ETCS L2 beschränkt. Auf den Korridor-Strecken, die zum konventionellen Bahnsystem zählen, liegt die zulässige Höchstgeschwindigkeit bei 160 km/h oder weniger, so dass hier ein verkehrlich sinnvoller Mix aus Level 2 und Level 1 LS Anwendung findet. Mehr zu der Strategie findet sich u. a. in [18] und [16].

Stand der Spezifikationen

Die Industrie wird bis mindestens 2012 ausschließlich Produkte auf Basis der System Requirements Specification (SRS) Version 2.3.0d ausliefern. Erst danach wird es einen Versionswechsel auf die SRS 3.0.0 geben. Der Ausrüstungsstandard Level 1 LS wird mit der Validierung der SRS 3.0.0 spezifiziert, in die TSI (Technische Spezifikation für Interoperabilität) aufgenommen und somit für die Zulassung in der Europäischen Union legalisiert.

Die Entwicklung der vollständigen Version 3.0 bedeutet die Implementierung der Change Requests (CR / Änderungsanforderungen), die von den europäischen Eisenbahngesellschaften eingereicht worden sind.

Die Kompatibilität der Versionen kann aus heutiger Sicht so beschrieben werden, dass die Version 2.2.2 keine Kompatibilität zu 2.3.0d und 3.0.0 aufweist. Dies ist insofern interoperabilitätshemmend, da die meisten europäischen Projekte aktuell mit der Version 2.2.2 realisiert sind. Die Kompatibilität zwischen den Versionen 2.3.0d und 3.0.0 ist teilweise kreuzweise gegeben, allerdings wird davon ausgegangen, dass im Fall der 2.3.0d - Fahrzeuge ein Software-Upgrade für den Verkehr auf den 3.0.0 Strecken erfolgen muss. Zur Kompatibilität zwischen den SRS-Versionen siehe auch die Abbildung 19 auf Seite 49. Da noch keine Serienprodukte existieren, sind die Unsicherheiten bezüglich der Kostenabschätzungen sehr groß. Das führt dazu, dass eine konsolidierte Migrationsplanung mit der entsprechenden Wirtschaftlichkeitsrechnung und Abstimmung mit den EVUs sehr schwierig zu realisieren ist.

Die Fragestellung der Interoperabilität wird immer im Zusammenspiel Strecke-Fahrzeug betrachtet. So ist es zwar nicht zwingend notwendig, dass unterschiedliche Streckenabschnitte zueinander kompatibel sind, gleichwohl ist es sicherzustellen, dass die relevante Fahrzeugflotte diese unterschiedlichen Abschnitte interoperabel befahren kann.

3 System-Vorselektion

In diesem Schritt gilt es, aus der Menge an möglichen Systemalternativen diejenigen für die weiteren Untersuchungen zu ermitteln, die den unumstößlichen Randbedingungen in dem jeweiligen Anwendungsfall genügen. Das Ziel ist die Reduzierung der Anzahl an zur Verfügung stehenden Systemalternativen, so dass der Untersuchungsraum für die Analyse der Migration i. e. S. verkleinert und der Prozess somit effizienter gestaltet wird. Da die Schritte System-Vorselektion und die Systemselektion zwei Stufen eines Auswahlprozesses darstellen, bietet sich die Wahl einer einheitlichen Bewertungsmethodik an, die ebenfalls in mehreren Stufen auf die Problemstellungen angewendet werden kann.

3.1 Methoden zur Bewertung und Auswahl von technischen Systemen

In der betrieblichen Praxis und nicht zuletzt bei der Einführung neuer Technologien kommt Problemen mit mehrfacher oder multikriterieller Zielsetzung eine große Bedeutung zu. Dabei wird zumeist eine Kombination aus quantitativen Zielen und den daraus zu definierenden Bewertungskriterien einerseits sowie qualitativen Zielen andererseits zusammen gestellt. Die Komplexität solcher Zielsysteme ist hoch, so dass der Auswahl der geeigneten Methode für die Entscheidungsunterstützung eine große Bedeutung beigemessen wird.

Die Entscheidungstheorie untersucht den Entscheidungsprozess bei Problemstellungen bzw. in Entscheidungssituationen. Diese Problemstellungen können dabei verschiedenartig sein, jedoch basieren sie alle auf der Auswahl einer Lösung aus mehreren wählbaren Alternativen. Wie oben bereits erwähnt, handelt es sich meist um Probleme, die durch das Berücksichtigen mehrerer Kriterien, mögliche Entstehung von Zielkonflikten oder Auftreten von unsicher vorhersagbaren Zuständen komplex werden. Zusätzlich kann die Problemlösung noch durch vorgegebene Restriktionen und eine Vielzahl von Lösungsmöglichkeiten erschwert werden [47].

Um die Entscheidungsfindung zu erleichtern und auf eine möglichst objektive und umfassende Basis zu stellen, soll der Entscheidungsprozess systematisch und methodisch unterstützt und eine rationale und objektive Lösung herbeigeführt werden. Dafür wurden unter verschiedenen Ansätzen Verfahren entwickelt, auf die später näher eingegangen werden soll. Die unterschiedlichen Ansätze resultieren aus der Vielzahl der möglichen Anwendungsgebiete der jeweiligen Verfahren.

Bei der Auswahl von geeigneten oder optimalen Handlungsalternativen im Rahmen der Bewertung technischer Systeme wird gegenwärtig auf gängige Methoden zurückgegriffen:

Methoden der dynamischen Investitionsrechnung, wie z.B. die Kapitalwertmethode

- Kosten-Nutzen-Analyse
- Argumentenbilanz
- Portfoliotechnik

- multikriterielle Methoden, wie z.B. die Nutzwertanalyse

Bei jeder dieser Methoden werden Expertenmeinungen und -einschätzungen unterstützend in die Entscheidungsfindung integriert.

Im Folgenden werden einige dieser Methoden kurz vorgestellt.

3.1.1 Kapitalwertmethode

Verfahren der Investitionsrechnung lassen sich in zwei Hauptgruppen unterteilen:

- statische Methoden
- dynamische Methoden

Der wesentliche Unterschied zwischen diesen beiden Arten von Verfahren besteht darin, dass die dynamischen Verfahren zeitliche Unterschiede im Anfall der Zahlungen einer Investition wertmäßig berücksichtigen. Bei den statischen Verfahren ist dies nicht der Fall [2].

Da Migrationsprozesse im Umfeld der Eisenbahn-LST eine relativ lange Dauer aufweisen – ETCS vsl. über mehrere Jahrzehnte in Europa – ist die Anwendung der dynamischen Methoden im Bereich dieser Fragestellung unabdingbar. Nur auf diese Art kann die Investition zu jedem Zeitpunkt richtig bewertet werden.

Je früher eine Investition anfällt, umso höher wird sie bewertet. Dies erfolgt durch das Auf- bzw. Abzinsen der Ein- und Auszahlungen. Dieses Vorgehen wird durch folgende Argumentation gerechtfertigt: je länger man eine Investition hinausschieben kann, desto höher ist der Zinsertrag aus der Anlage der zur Verfügung stehenden Finanzmittel und der Wert der Auszahlung also niedriger. Dies soll keinesfalls bedeuten, dass die Verzögerung einer Investition grundsätzlich vorteilhaft ist. Je früher eine Investition getätigt wird, desto eher erfolgen auch die daraus resultierenden Rückflüsse (RoI: Return on Investment). Daher ist eine fallweise Untersuchung notwendig.

Eine der gängigsten Methoden der dynamischen Investitionsrechnung ist die Kapitalwertmethode. Auf Grundsätzen dieser Methode basiert die finanzielle Bewertung der Migrationsstrategien im Abschnitt 5.

An dieser Stelle müssen zunächst einige Grundbegriffe definiert werden [10].

Zahlungszeitpunkt ist derjenige Zeitpunkt, dem eine Zahlung aus der Zahlungsreihe einer Investition zugerechnet wird. Der Wert einer Zahlung in ihrem Zahlungszeitpunkt wird als ihr *Zeitwert* bezeichnet.

Bezugszeitpunkt ist der Zeitpunkt, auf den die Zahlungsreihe einer Investition auf- bzw. abgezinst wird. Zumeist wird dabei der Beginn des Planungszeitraums gewählt. Den Wert einer Zahlung zum Beginn des Planungszeitraums bezeichnet man als ihren *Barwert*.

Der *Kalkulationszinssatz* ist der Zinssatz, mit dem alle Zahlungen auf den Bezugszeitpunkt auf- oder abgezinst werden. Dabei kann dieser Wert zwischen dem Sollzinssatz (für die Kreditaufnahme) und dem Habenzinssatz (für die Finanzmittelanlage) gewählt werden.

Der Kapitalwert einer Investition im Zeitpunkt $t = 0$, also zum Beginn des Planungszeitraums, ist definiert als Summe der Barwerte der einzelnen Positionen in der Zahlungsreihe. Typischerweise weist eine Investition folgende Zahlungsreihe auf:

Zeitpunkt $t = 0$: Anfangsinvestition / Ausgabe für Anschaffung (I_0)

Zeitraum $t = 1$ bis $t = T - 1$: Rückflüsse aus der Investition / Einnahmen (R)

Zeitpunkt $t = T$: Liquidationserlös (bzw. Entsorgungskosten, dann $L < 0$) zum Ende des Planungszeitraums T (L)

Somit würde sich der Kapitalwert C_0 mit dem Kalkulationszinssatz i wie folgt berechnen [10]

$$C_0 = -I_0 + \left(\sum_{t=1}^{T-1} R_t \cdot \frac{1}{(1+i)^t} \right) + L_T \cdot \frac{1}{(1+i)^T} \quad (1)$$

Ist der Kapitalwert einer Investition positiv, dann verzinst sich das gebundene Kapital zum Kalkulationszinssatz und darüber hinaus wird ein Vermögenszuwachs erwirtschaftet. Ist der Kapitalwert negativ, dann verzinst sich das gebundene Kapital zu einem geringeren Zinssatz als dem Kalkulationszinssatz i . Wenn davon ausgegangen werden kann, dass der Entscheidungsträger auf dem Kapitalmarkt unbeschränkt finanzielle Mittel aufnehmen und anlegen kann, dann ist ein Investitionsprojekt nur dann absolut vorteilhaft, wenn sein Kapitalwert mindestens gleich Null ist. Ansonsten kann das für die Investition beschaffene Kapital zu einem höheren Zinssatz auf dem Kapitalmarkt angelegt werden [2].

Bei der Bewertung verschiedener Investitionsalternativen ist diejenige relativ vorteilhafter, die einen höheren Kapitalwert aufweist.

Im Abschnitt 5 wird diese Methode in abgewandelter Form für die Berechnung der Migrationskosten einer ETCS-Investition verwendet.

3.1.2 Nutzwertanalyse

Die Nutzwertanalyse ist eine Planungsmethode zur systematischen Entscheidungsvorbereitung bei der Auswahl von Projekt- oder Systemalternativen. Sie ist aus den Ingenieurwissenschaften entstanden und ermöglicht neben den finanziellen Aspekten ebenfalls die Betrachtung nichtmonetärer Bewertungskriterien und zielt somit nicht ausschließlich auf die wirtschaftliche Effizienz hin.

Die Nutzwertanalyse untersucht „eine Menge komplexer Handlungsalternativen mit dem Zweck, die Elemente dieser Menge entsprechend den Präferenzen des Entscheidungsträgers bezüglich eines multidimensionalen Zielsystems zu ordnen“ [64]. Auf Basis von definierten Bewertungskriterien wird die Ermittlung der Nutzwerte vorgenommen. Vergleich dieser Werte der verschiedenen Alternativen ermöglicht die Prüfung dieser Alternativen auf ihre relative Vorteilhaftigkeit hin. Wie bei allen semiquantitativen und qualitativen Bewertungsverfahren können dabei auch Informationen berücksichtigt werden, die den Entscheidungsalternativen lediglich eine Rangordnung oder relative Abstände zueinander zuordnen [2].

Die Nutzwertanalyse, erfolgt in mehreren Schritten (Abbildung 9).

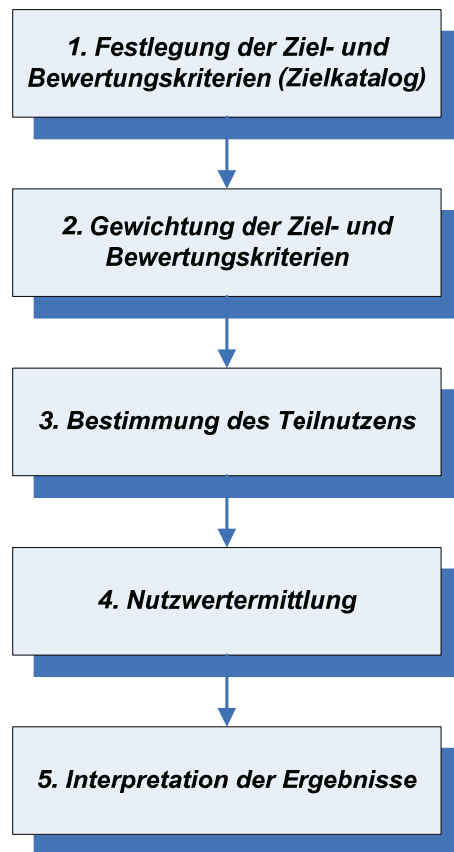


Abbildung 9: Ablauf der Nutzwertanalyse / in Anlehnung an [64]

Die Grundlage der Nutzwertanalyse ist die Erstellung des Zielkatalogs. Dazu werden einzelne Ziele bestimmt und analysiert sowie die konkreten Bewertungskriterien definiert. Sie dienen als Maßstab des Gesamtnutzens der zu bewertenden Handlungsalternativen.

Im nächsten Schritt werden die Kriterien gewichtet. Die Gewichtung der Kriterien ermöglicht die Berücksichtigung einer Zielhierarchie. Bei der eigentlichen Bewertung wird anhand der einzelnen Kriterienerfüllungsgrade für jede Kriterium-Alternative-Kombination ein Teilnutzen ermittelt.

Durch die Addition der Teilnutzen wird der Nutzwert der jeweiligen Alternative ermittelt. Abschließend wird das Ergebnis der Bewertung interpretiert. Die Alternative mit dem größten Nutzwert gilt als die relativ vorteilhafteste. Durch einen Vergleich zu dem maximal zu erreichenden Nutzwert kann außerdem die absolute Vorteilhaftigkeit einer Alternative bestimmt werden.

Trotz des systematischen Vorgehens im Rahmen der Nutzwertanalyse, kann aufgrund der Notwendigkeit subjektiver Entscheidungen bei der Definition des Zielkatalogs sowie in der Bewertungsphase nicht die Objektivität der Methoden der Investitionsbewertung erreicht werden. Der große Vorteil ist die Möglichkeit der Einbeziehung von nicht-monetären Größen.

Gerade im Prozessschritt der Systemselektion kommt dieser Eigenschaft der Nutzwertanalyse eine große Bedeutung zu. Des Weiteren ist die Nutzwertanalyse ein wesentlicher methodischer Baustein der im späteren Verlauf zu behandelnden erweiterten Wirtschaftlichkeitsanalyse.

3.1.3 Portfoliotechnik

Die Portfoliotechnik oder Portfolioanalyse wurde ursprünglich in der Finanzwirtschaft zur Planung und Zusammenstellung von Wertpapierbündeln entwickelt. Mittlerweile ist sie eines der meist angewendeten Planungs- und Analyseinstrumente des strategischen Managements, wobei sie u. a. zur Bestimmung von Produkt-Markt-Strategien oder der strategischen Technologieentwicklung. So können beispielsweise anhand des Portfolios der Boston Consulting Group (BCG) Produkte oder Dienstleistungen eines Unternehmens anhand ihres Marktanteils einerseits und des potentiellen Wachstums andererseits in die Kategorien

- Stars,
- Cash Cows,
- Question Marks und
- Poor Dogs

eingeteilt werden. Auf dieser Basis können strategische Entscheidungen hinsichtlich der Positionierung der bestehenden Geschäftsfelder bzw. der Neuausrichtung hin zu innovativen Geschäftsideen getroffen werden (Abbildung 10).

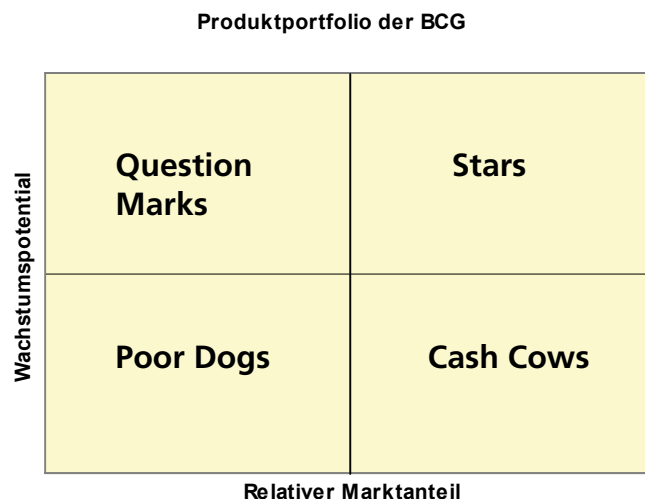


Abbildung 10: Produktportfolio-Matrix der BCG / in Anlehnung an [10]

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Portfoliomethode für die Bewertungsprozesse eingesetzt, bei denen zwei Führungsgrößen bzw. Kennzahlen als Bewertungskriterien definiert werden, die nicht unmittelbar miteinander vergleichbar sind.

3.1.4 Auswahl einer geeigneten Methode

Für die Auswahl des geeigneten Zielsystems für die Migration bieten sich aufgrund der Anzahl und Komplexität der Einflussfaktoren und Randbedingungen (technisch, betrieblich, wirtschaftlich, politisch, etc.) Methoden der multikriteriellen Analyse an.

Die hier gewählte Methode kombiniert mehrere oben vorgestellte Ansätze und wird die erweiterte Wirtschaftlichkeitsanalyse EWA [4] genannt. Die EWA unterscheidet sich in der Form von der traditionellen Bewertung von Investitionsvorhaben, indem sie eine einseitige Betrachtung direkt monetärer Größen durch die Berücksichtigung indirekt monetär erfassbarer und auch nichtmonetärer Investitionswirkungen ergänzt. Als Instrument der Entscheidungshilfe bei Investitionsvorhaben verbindet sie dazu die traditionelle finanzanalytische Investitionsrechnung mit einer Nutzwertanalyse und bildet somit ein methodisch integriertes Verfahren.

Die EWA berücksichtigt drei Arten von Bewertungskriterien:

- Monetäre Kriterien (direkt oder indirekt)
- Nichtmonetäre quantitative Kriterien
- Nichtmonetäre qualitative Kriterien

Die obige Darstellung (Abbildung 11) hilft bei der Einordnung der EWA in den Kontext der Wirtschaftlichkeitsanalyse-Verfahren.

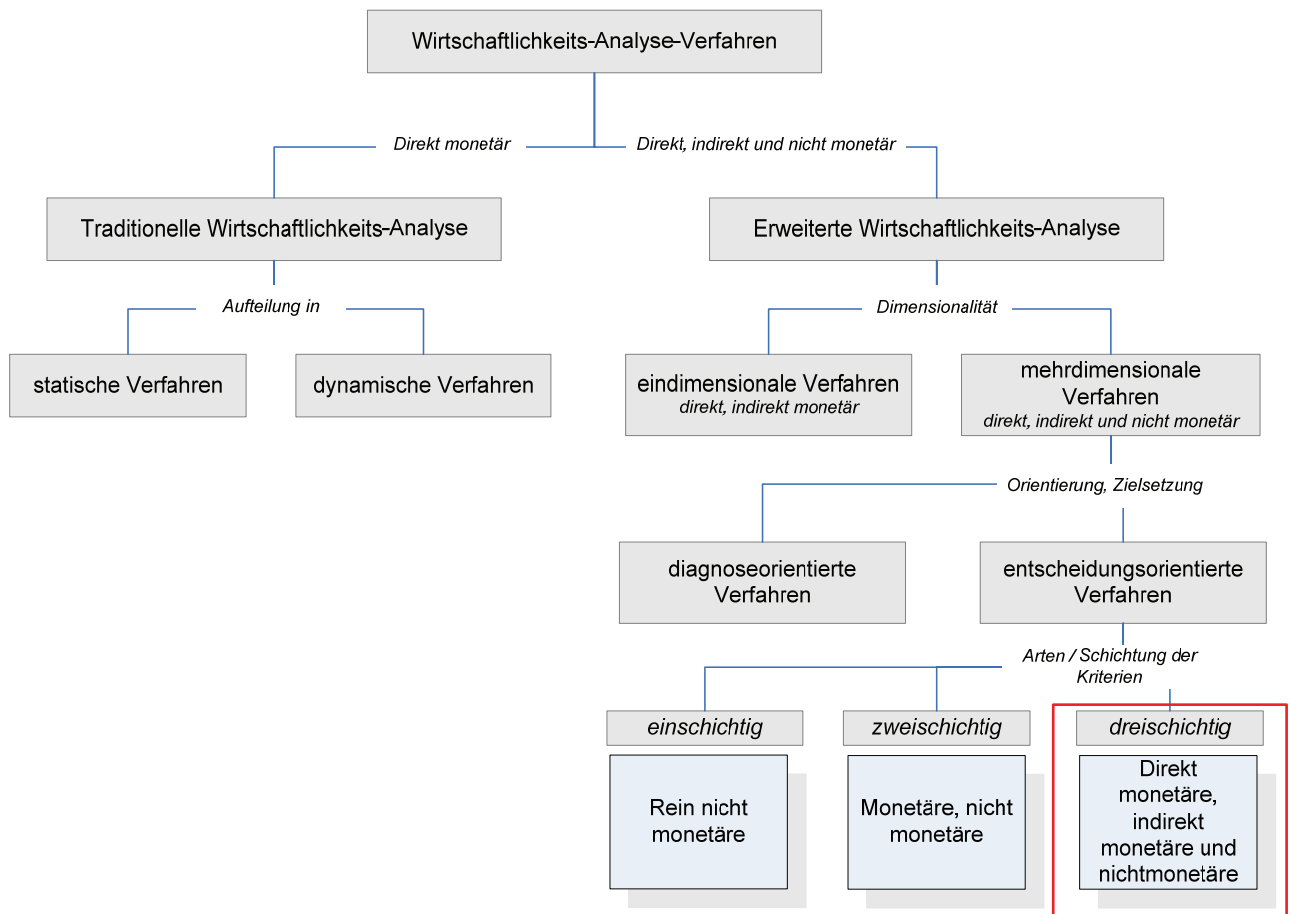


Abbildung 11: Unterteilung der Verfahren zur Wirtschaftlichkeitsanalyse nach Zangemeister [64]

Bei der Durchführung des dreistufigen EWA-Verfahrens nach Zangemeister werden bei der Bewertung der monetären Kriterien finanzanalytische Methoden der Investitionsrechnung angewendet sowie ggf. die LCC-Berechnung nach DIN EN 60030-3-3 [14]. Bei der Bewertung der quantifizierbaren sowie der nicht quantifizierbaren nichtmonetären Kriterien wird eine nutzwertanalytische Punktebewertung angewendet.

Als Unterschied zu der von Zangemeister beschriebenen Methode, wird die Nutzwertanalyse hier zweistufig ausgeführt. Dabei wird zwischen den quantifizierbaren Kennzahlen und den rein qualitativ zu beschreibenden Größen unterschieden. Zwei Stufen dienen dazu, die Subjektivität zu minimieren. So entsteht eine vierstufige, den Bedürfnissen der Problemstellungen bei der Auswahl der zu migrierenden LST angepasste EWA (Abbildung 12).

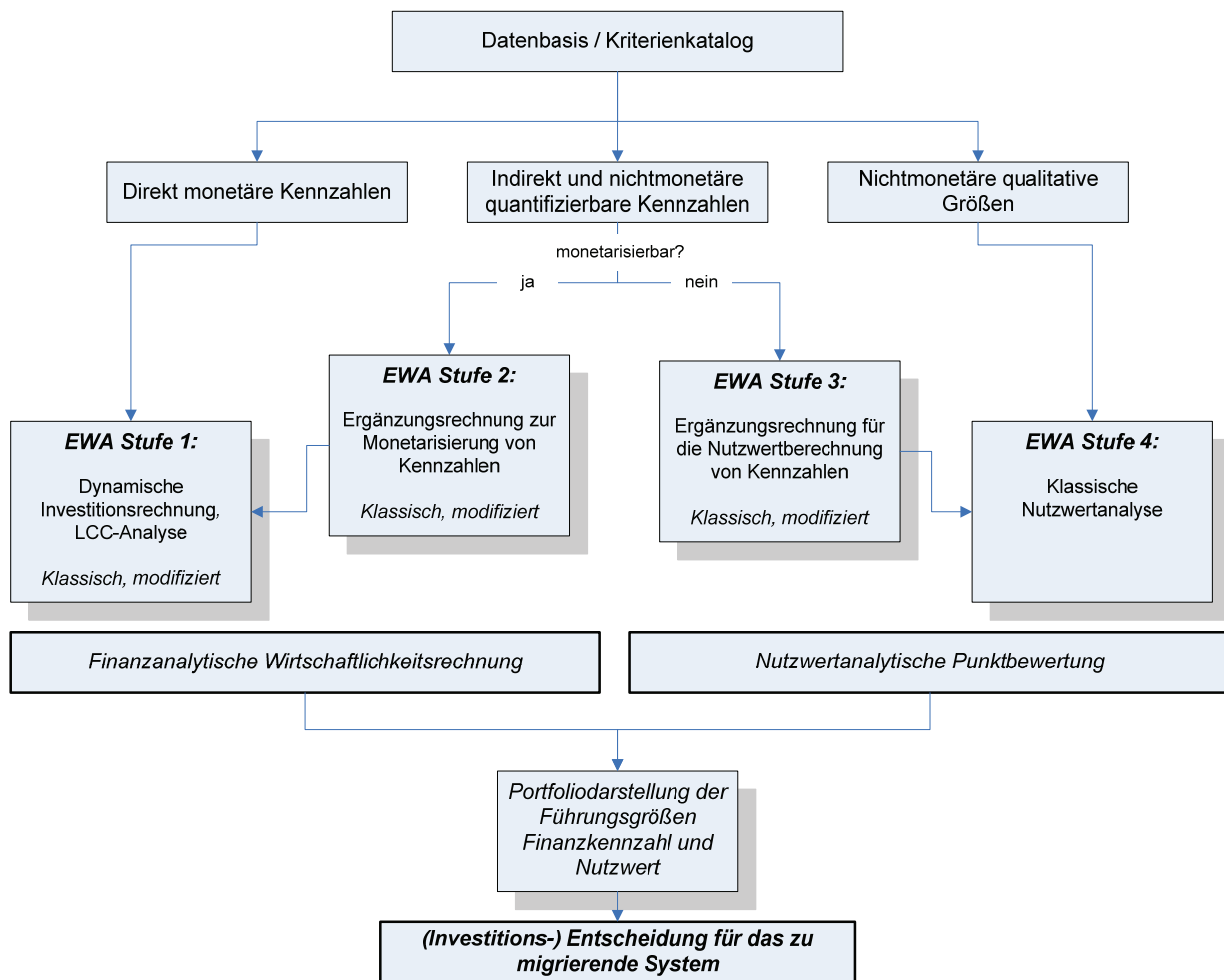


Abbildung 12: Modifizierte 4-Stufen EWA

Der Nutzwert der jeweiligen Alternative determiniert die qualitative, in Nutzwertpunkten ausgedrückte Dimension der relativen Vorteilhaftigkeit. Durch einen Vergleich mit dem maximal zu erreichenden Nutzwert kann außerdem die absolute Vorteilhaftigkeit bestimmt werden. Dies ist hier lediglich auf die nichtmonetäre Dimension bezogen.

Arten von Bewertungskriterien sind dabei folgende:

- Monetär: LCC, Migrationskosten,
- Quantifizierbare betriebliche oder technische Kriterien und die Migrationsdauer
- Nicht quantifizierbare betriebliche, politische oder andere Kriterien
- Definition der Ausschlusskriterien (z. B. Realisierung der technischen Interoperabilität)

3.2 Randbedingungen für die System-Vorselektion im Umfeld der ETCS-Migration

Eine vollständige EWA kann im Prozessschritt der System-Vorselektion (s. dazu auch die Abbildung 6, Abschnitt 2.2) noch nicht durchgeführt werden, da die Kennzahlen Migrationszeit und -kosten noch nicht bekannt sind. Die konkrete Auswahl eines Zielsystems wäre an dieser Stelle zu ungenau, da die Migrierbarkeit des Systems ausschlaggebend für seine Selektion sein kann. Daher wird die Anzahl an Systemalternativen durch die Vorauswahl zunächst vermindert. Damit keine guten Lösungen unbeabsichtigt herausgefiltert werden, sollen bei dieser Vorauswahl nur die Systemalternativen verworfen werden, die den unverrückbaren Randbedingungen / Ausschlusskriterien (3.1.4 d) nicht genügen. Dies vergrößert zwar den Betrachtungsraum hinsichtlich der Entwicklung sowie der Bewertung von Migrationsstrategien, diese Schritte sollen aber durch die Rechnerunterstützung zeitlich effizienter gestaltet werden.

Die hier adressierten Randbedingungen sind zumeist rechtlicher Natur auf nationaler oder internationaler Ebene, oder z. B. auch im Bereich der Sicherheitsanforderungen an bestimmte Funktionen gebunden. Dies ist jeweils am konkreten Anwendungsfall zu prüfen und unterscheidet sich im Bereich der regionalen Infrastruktur zum Teil stark von den Fernverkehrs- oder Hochgeschwindigkeitsstrecke.

3.2.1 Rechtliche Grundlagen für die ETCS-Einführung

Über die letzten ca. 15 Jahre wurden auf europäischer Ebene zahlreiche Richtlinien zur Harmonisierung des europäischen Eisenbahnsystems, seiner Interoperabilität sowie zur Senkung der Markteintrittsbarrieren und dem diskriminierungsfreien Zugang zur Infrastruktur verfasst und veröffentlicht. Für die ETCS-Einführung sind in erster Linie die Richtlinien zur Interoperabilität relevant.

Die TEIV (Transeuropäische-Eisenbahn-Interoperabilitätsverordnung) regelt einerseits die Umsetzung der Richtlinie 96/48/EG des Europäischen Rates über die Interoperabilität des transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystems vom 23. Juli 1996 und andererseits der an die 96/48 angepassten Richtlinie 2001/16/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über die Interoperabilität des konventionellen Eisenbahnsystems vom 19. März 2001. Die Richtlinie 96/48/EG legt die Bedingungen für die Interoperabilität des transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystems fest, welche die Planung, den Bau, den Ausbau sowie die Umrüstung und den Betrieb der Infrastruktur und der Fahrzeuge betreffen [7], [48], [49]. Das Hochgeschwindigkeitsbahnsystem umfasst sowohl die Eisenbahninfrastruktur der transeuropäischen Verkehrsnetzes (TEN) für den Hochgeschwindigkeitsverkehr wie auch die Fahrzeuge, die auf diesen Strecken verkehren. Innerhalb dieser Richtlinie wird das System in strukturelle und funktionale Teilsysteme unterteilt. Die Bauteile oder Komponenten dieser Teilsysteme werden Interoperabilitätskomponenten (IK) bezeichnet, wenn diese für die Interoperabilität direkt oder indirekt verantwortlich sind [7]. So sind ein RBC, Balisen oder LEUs als IK zu bezeichnen, ein Stellwerk jedoch nicht. Dieses kann weiterhin als nationale Lösung realisiert werden. Es sind „lediglich“ die Schnittstellen zu den IK zu realisieren.

Diese beiden o. g. Richtlinien formulieren die Verpflichtung zur Umsetzung der TSI (Technische Spezifikationen zur Interoperabilität) im Rahmen der relevanten Infrastruktur- und Fahrzeugausrüstung. Die TSI wird formuliert im Hinblick auf

- Erfüllung der grundlegenden Anforderungen,
- Herstellung der wechselseitig erforderlichen funktionalen Beziehungen zwischen den Teilsystemen,
- Gewährleistung der Kohärenz des Systems. [7]

Die Richtlinien geben also vor, dass für alle Bereiche des Schienenverkehrs – auch für den Bereich Zugsteuerung, Zugsicherung und Signalgebung – ZZS (Control, Command and Signalling – CCS) TSI zu erarbeiten sind, welche die Funktionen, Schnittstellen und Eckwerte der jeweiligen Teilsysteme definieren. Die ETCS-Einführung dient als technische Lösung für die Umsetzung der Technischen Spezifikationen zur Interoperabilität für den Bereich ZZS.

Somit ist die TEIV auch die juristische Basis der Umsetzung der TSI. Auf dieser juristischen Basis erfolgt die Abstimmung der nationalen Migrationspläne für das System ETCS.

Auf weitere Dokumente in diesem Zusammenhang soll hier nicht im Detail eingegangen werden. Diese sind unter [20] verfügbar.

Im Rahmen dieser Vorselektion sollen Systemvarianten aus der Auswahl herausgefiltert werden, die den gesetzlichen Randbedingungen nicht genügen. Es wird die Annahme getroffen, dass bei der Ausrüstung einer Neubau- oder Ausbaustrecke bzw. bei der Nachrüstung einer vorhandenen Strecke auf dem Netz der DB AG zurzeit folgende Auswahl an Zugbeeinflussungssystemen besteht

- PZB (Klasse B System / nationales System)
- LZB (Klasse B System / nationales System)
- ETCS Level 1 (Klasse A System / interoperables System)
- ETCS Level 1 LS (Klasse A System / interoperables System)
- ETCS Level 2 (Klasse A System / interoperables System)

Aufgrund der fehlenden Einsatzreife wird ETCS Level 3 hier nicht behandelt.

Es gilt zunächst zu ermitteln, ob für eine konkrete Strecke bzw. Fahrzeuge die TSI Anwendung finden müssen. Ist dies der Fall, kann die ausschließliche Beibehaltung der nationalen Systeme PZB und LZB ausgeschlossen werden. Auf Basis der Richtlinien 96/48/EG und 2001/16/EG gelten hierzu folgende Regelungen:

Fahrzeugseitige Einrichtungen

Installation von ETCS (gegebenenfalls durch STM ergänzt) in Fahrzeugen, die eine Strecke befahren, auf der mindestens ein Streckenabschnitt mit ETCS ausgestattet ist (auch wenn sie einem Klasse-B-System überlagert wird), ist in folgenden Fällen verbindlich:

- Neuinstallationen im Bereich Signalisierung oder Funk einer Systemgruppe (Assembly) des ZZS

- Upgrade einer im Bereich Signalisierung oder Funk bestehenden Systemgruppe (Assembly) des ZZS, durch die sich die Funktion oder die Leistung des Teilsystems ändert

Streckenseitige Infrastruktur

Installation von ETCS ist in folgenden Fällen verbindlich:

- Neuinstallationen im Bereich Signalisierung oder Funk einer Gruppe (Assembly) des ZZS
- Upgrade im Bereich Signalisierung oder Funk einer bereits in Betrieb befindlichen Gruppe (Assembly) des ZZS, wodurch sich die Funktion oder die Leistung des Teilsystems ändert

Anhand dieser Bedingungen – vorgeschriebene Interoperabilität und (bedingt) die Einsatzreife der Systeme – können die ersten Kriterien für die Vorselektion identifiziert werden.

3.2.2 Nationale (EBO-) Anforderungen an Zugbeeinflussungssysteme

Zusätzlich zu den europäischen Anforderungen und verbindlichen Vorgaben gilt es ebenfalls, bei der Auswahl des Zielsystems die nationalen Regeln zu beachten. So gibt es grundsätzlich laut der Eisenbahnbau -und Betriebsordnung EBO Unterschiede zwischen der LST auf Haupt- und Nebenbahnen, wie die folgende Tabelle beispielhaft zeigt.

	Zugmeldeverfahren		Zugleitbetrieb	Sign. Zugleitbetrieb
Ausrüstungskriterium	Hauptbahnen	Nebenbahnen	Nebenbahnen	Nebenbahnen
Signaltechnik	Vorhanden	Vorhanden	Nicht vorhanden	Vorhanden
Einfahrtsignale	Vorhanden	Wenn $v > 50 \text{ km/h}$	Nicht vorhanden	Vorhanden
Ausfahrtsignale	Vorhanden	Wenn $v > 60 \text{ km/h}$	Nicht vorhanden	Vorhanden
Vorsignale	Vorhanden	Wenn $v > 60 \text{ km/h}$	Nicht vorhanden	Vorhanden
Signalabhängigkeit von Weichen	Vorhanden	Wenn $v > 50 \text{ km/h}$	Nicht vorhanden	Vorhanden
Streckenblock	Bei dichter Zugfolge	Nicht vorhanden	Nicht vorhanden	Vorhanden, teilweise in vereinfachter Form
Zugbeeinflussung	Wenn $v > 100 \text{ km/h}$	Nicht vorhanden	Nicht vorhanden	Nicht vorhanden
Max. Streckengeschwindigkeit	250 km/h	100 km/h	80 km/h	100 km/h

Tabelle 2: Vergleich der Anforderungen an die Streckenausrüstung bei verschiedenen Betriebsverfahren und Streckentypen [51]

Laut §15 Streckenblock, Zugbeeinflussung der EBO (Eisenbahnbau- und -betriebsordnung) gilt folgendes [13]:

„ ...

(2) Strecken, auf denen mehr als 100 km/h zugelassen sind, müssen mit Zugbeeinflussung ausgerüstet sein, durch die ein Zug selbsttätig zum Halten gebracht und ein unzulässiges Anfahren gegen Halt zeigende Signale selbsttätig verhindert werden kann.

(3) Strecken, auf denen mehr als 160 km/h zugelassen sind, müssen mit Zugbeeinflussung ausgerüstet sein, durch die ein Zug selbsttätig zum Halten gebracht und außerdem geführt werden kann.

...”

Dies ist insbesondere ein Entscheidungskriterium zwischen der PZB (bis 160 km/h) und der LZB (>160 km/h). Anhand dieses Kriteriums kann ebenfalls die Randbedingung formuliert werden, dass die grundsätzlich punktförmigen Systeme ETCS Level 1 und LS für die Geschwindigkeiten bis 160 km/h eingesetzt werden können, während das kontinuierlich wirkende System ETCS Level 2 auch für die Geschwindigkeiten über 160 km/h zulässig ist.

Die Anwendung dieser Regeln und damit eine beispielhafte System-Vorselektion findet im Abschnitt 5.4 statt.

Aufgrund der oligopolistischen Marktstrukturen in der Domäne der Eisenbahnleit- und Sicherungstechnik und damit der überschaubaren Anzahl der jeweils zur Verfügung stehenden Lieferanten und Systeme, ist der Lösungsraum der praktisch vorhandenen Systemalternativen relativ niedrig. So bilden die oben dargestellten Randbedingungen für die Vorselektion anhand der gesetzlichen Randbedingungen ein methodisches Vorgehen ab, das in der Praxis sehr gut anwendbar ist und die Komplexität des Gesamtproblems der Migration nicht signifikant erhöht.

Auf Basis der hier dargestellten Randbedingungen, wird der Schritt der System-Vorselektion im ersten Teil der Fallstudie (Abschnitt 5.4) durchgeführt.

4 Entwicklung von Migrationsstrategien

Nachdem im Rahmen der System-Vorselektion die für den bestimmten Anwendungsfall zulässigen Varianten ausgewählt werden können, gilt es hier jeweils den optimalen Weg vom aktuellen Zustand zu diesen Systemen zu finden. Anhand des Vergleichs zwischen der aktuellen und der ausgewählten Systemkonfiguration mittels der Systembeschreibung werden die für den Systemwechsel notwendigen Maßnahmen ermittelt.

Infolge der Durchführung dieser Maßnahmen kann ein Migrationsszenario als zeitliche Abfolge von Zuständen und Zustandsübergängen beschrieben werden. Aufgrund der Tatsache, dass in der Bahndomäne eine wissenschaftliche Auseinandersetzung mit dem Thema Migration vornehmlich im Rahmen von ETCS stattgefunden hat und gegenwärtig stattfindet, wird auch hier zum Verdeutlichen der Vorgänge auf das Beispiel zurückgegriffen.

Der Prozess der Entwicklung von möglichen Migrationsstrategien ist aufgrund der komplexen Abhängigkeit und der fallweise unterschiedlichen Schnittstellen- sowie Kompatibilitätsbedingungen sehr schwierig zu automatisieren. Es ist jedoch unabdingbar, eine systematische Vorgehensweise zu wählen. Aufgrund der Komplexität ist häufig die Situation gegeben, dass ein Zielzustand nicht unmittelbar aus dem aktuellen Zustand zu erreichen ist. Dann ist ein schrittweiser Systemwechsel über Zwischenstufen notwendig.

Ähnlich dem Geschäftsprozess der Unternehmensplanung können Migrationsfragestellungen im Umfeld der Eisenbahnleit- und -sicherungstechnik auf drei Ebenen betrachtet werden:

- **strategische** Ebene der Migration
- **taktische** Ebene der Migration
- **operative** Ebene der Migration

Diese Arbeit und die hier vorgestellte Methodik fokussieren die taktische und insbesondere die operative Ebene der Migrationsfragestellungen. Die Entscheidungen auf der strategischen Ebene der ETCS-Migration sind bereits weitgehend getroffen worden und bilden somit den Handlungsrahmen der beiden anderen Ebenen.

Die im Bereich der Unternehmensplanung ebenfalls häufig verwendete dispositive Ebene zur kurzfristigen Steuerung von Maßnahmen ist hier in der operativen Ebene subsumiert und wird nicht separat behandelt.

Zunächst wird eine Einführung in die jeweiligen oben genannten Aspekte vorgenommen, bevor die Basisstrategien für die ETCS-Migration auf der operativen Ebene detailliert erläutert und die Möglichkeiten der Kopplung mit der taktischen Ebene vorgestellt werden.

4.1 Strategische Ebene der Migration

Schieneninfrastruktur ist ein wertvolles volkswirtschaftliches Allgemeingut. Seine Erstellung und Vorhaltung werden zunehmend anhand der Marktentwicklung und der damit verbundenen volks- und betriebswirtschaftlichen Faktoren einerseits sowie der Aspekte der Umweltver-

träglichkeit und Nachhaltigkeit andererseits gesteuert [61]. In letzter Instanz sind dabei die verfügbaren Investitionsmittel entscheidend, die so effektiv und effizient wie möglich eingesetzt werden müssen. Um die Entscheidungen über den Einsatz solcher Mittel systematisch und objektiv vorzubereiten, bieten sich methodische Ansätze aus dem Bereich der Makroökonomik an.

Da im Zusammenhang mit dem System Bahn von Netzen und Netzwerken gesprochen wird, werden hier für die Darstellung der strategischen Wirkungsbeziehungen im Rahmen der Einführung einer neuen Technologie netzwerkökonomische Betrachtungen angewendet. Dabei sollen u. a. Entscheidungsgrundlagen für den Umstieg von einem etablierten auf ein neues System sowie der damit im Zusammenhang stehende Begriff der kritischen Masse adressiert werden.

4.1.1 Netzwerkökonomische Betrachtung

Der Begriff des Netzwerks wird ähnlich dem Begriff Migration in unterschiedlichen Zusammenhängen benutzt und häufig je nach Anwendung verschieden definiert. Grundsätzlich kann bei einem Netzwerk von einer Menge von Linien gesprochen werden, die Knoten miteinander verknüpfen [17]. Diese Verknüpfungen können beispielsweise durch Schienenfahrzeuge oder auch Telefonleitungen hergestellt werden. Im Rahmen der Netzwerkökonomik werden Märkte mit Netzwerkstrukturen bzw. Netzwerkgüter analysiert. Es wird angenommen, dass ein Netzwerkgut vorliegt, wenn entweder der Nutzen vom Konsum dieses Gutes für einen Konsumenten steigt, je mehr Konsumenten das Gut kaufen oder wenn sich das Gut aus mehreren komplementären Komponenten zusammensetzt.

Diese Aspekte bzw. die Eigenschaften der Eisenbahn-LST als Netzwerkgut können anhand der Beispiels ETCS verdeutlicht werden. Dabei ist hier das ETCS-Netzwerk als Geflecht bestehend aus den von den EIU mit ETCS ausgerüsteten Strecken und den von den Verkehrsunternehmen EVU mit ETCS ausgerüsteten Fahrzeugen zu verstehen (Abbildung 13, Seite 42).

Der Nutzen der Ausrüstung einer Strecke mit ETCS für das EIU wird neben den möglichen langfristigen Einspareffekten im Bereich der LCC maßgeblich von der Nachfrage nach Trassen determiniert. Aufgrund der fehlenden Kompatibilität der nationalen Zugsicherungssysteme mit ETCS steigt diese Nachfrage seitens der Verkehrsunternehmen mit der Anzahl der Fahrzeuge, die sie mit dem System ETCS ausgerüstet haben. Die Verkehrsunternehmen als Konsumenten der Infrastruktur profitieren dabei von der Ausrüstung der Züge weiterer EVU mit ETCS, da dadurch tendenziell die Motivation der Infrastrukturunternehmen steigt, das neue System auf den Strecken zu implementieren und somit das nutzbare Netz in seiner Länge vergrößert wird.

Da das System ETCS für die Bahnunternehmen ein Investitionsgut ist, kann insbesondere im Fall der EVU bei falscher Systemwahl bei der Ausrüstung der Fahrzeugflotte von essentiellen Entscheidungen für den (Miss-) Erfolg des Unternehmens gesprochen werden.

Da für eine sichere Betriebsabwicklung die Kommunikation der strecken- mit den fahrzeugseitigen Systemkomponenten notwendig und hier somit eine Kompatibilität gewährleistet sein

muss, kann von einem komplementären Zusammenspiel zweier Systemanteile gesprochen werden.

Analog zu diesen Systemeigenschaften teilt die Netzwerkökonomik zwecks Systematisierung die von ihr zu untersuchenden Netzwerke in zwei Kategorien ein:

- Kommunikationsnetzwerke und
- Komponentennetzwerke [17] [23]

Ein Kommunikationsnetzwerk ist dadurch gekennzeichnet, dass direkte Netzwerkeffekte den Nutzen eines Verbrauchers im Netzwerk erhöhen, sobald ein neuer Konsument dem Netzwerk beiträgt. Am Beispiel des Zugsicherungssystems ETCS wurde oben skizziert, dass ein eher indirekter Netzwerkeffekt in Form der Motivation der EIU zur Erweiterung des ETCS-Netzes generiert wird. Dabei kann auf der Seite der Eisenbahn-Verkehrsunternehmen grundsätzlich eine Unterscheidung hinsichtlich der Marktanteile vorgenommen werden. Größere EVU mit einem hohen Marktanteil bzw. Trassenmenge können eher auf die Einführung einer neuen Technik auf der Infrastrukturseite Einfluss nehmen als kleinere EVU. Analog ist auch die Erwartung der indirekten Netzwerkeffekte zu klassifizieren. Da die Unternehmen diese Erwartungen idealerweise im Vorfeld analysieren, werden sie auch zu der – zumindest auf Basis der Marktmechanismen und der dazugehörigen Netzwerkeffekte – entsprechend unterschiedlichen Erkenntnis gelangen.

EVU mit hohen Marktanteilen

Erwartungen der hohen Beeinflussung des EIU durch eigene Entscheidungen und somit der Möglichkeit, oben beschriebene indirekte Netzwerkeffekte zu erzeugen

Entscheidung für die ETCS-Migration als Vorreiter denkbar.

EVU mit niedrigen Marktanteilen

Erwartung der niedrigen Beeinflussung des EIU durch eigene Entscheidungen und somit der Möglichkeit, oben beschriebene indirekte Netzwerkeffekte selbst zu erzeugen.

Entscheidung für die ETCS-Migration als Vorreiter eher nicht denkbar.

Aus der Sicht der notwendigen Investitionshöhe für die Umrüstung der vorhandenen Fahrzeugflotte bzw. Ausrüstung der neuen Fahrzeuge mit ETCS kann hier von einem gegenläufigen Effekt ausgegangen werden. Dort sind die Switching Costs, die hier mit den Migrationskosten verglichen werden können, bei den kleineren Fahrzeugflotten wesentlich geringer zumal hier bei kleineren EVU häufig auch Leasing-Modelle vorzufinden sind. So bedienen sich diese Verkehrsunternehmen der Fahrzeuge aus den Pools der entsprechenden Leasingunternehmen.

Ein Komponentennetzwerk besteht aus komplementären Gütern, die von den Konsumenten zu einem Produktsystem kombiniert werden müssen. Die einzelnen Komponenten haben iso-

liert betrachtet keinen oder nur einen geringen Wert. Der Beitritt eines weiteren Konsumenten zu diesem Netzwerk hat wiederum keinen direkten Einfluss auf das Nutzenniveau. Die indirekten Effekte hinsichtlich der Marktpreise einerseits sowie der o. g. Infrastrukturbereitstellung andererseits stehen in einem Zusammenhang mit der Verbreitung der Systems bei den EVU.

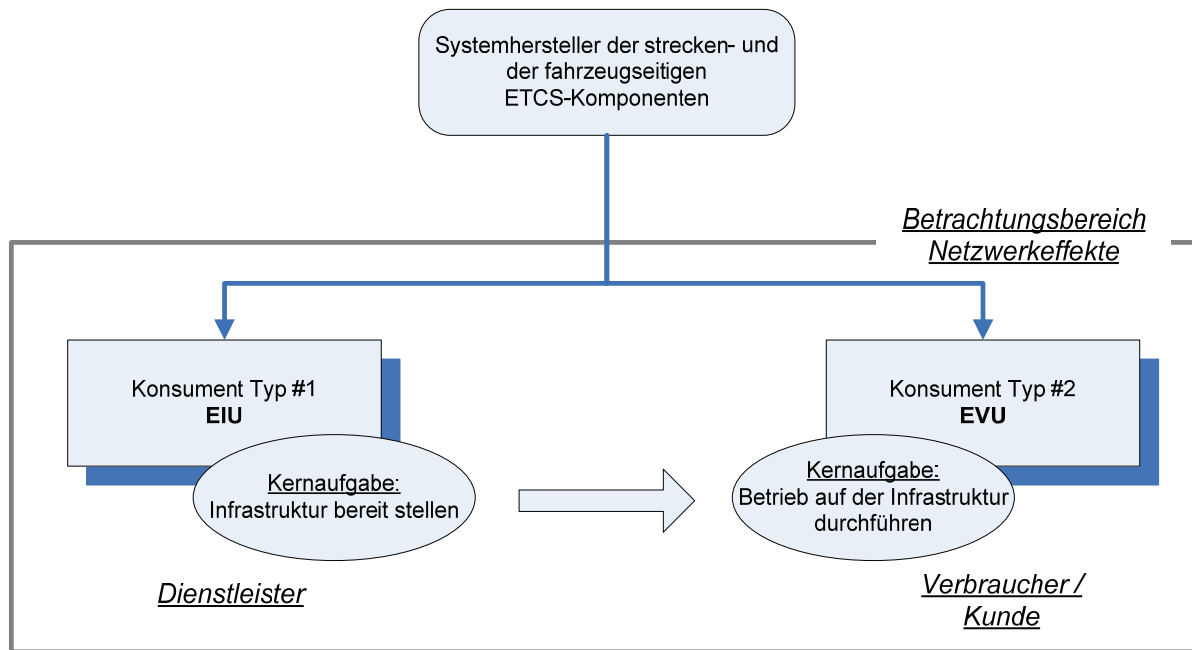


Abbildung 13: Betrachtungsbereich Netzwerkeffekte

Nehmen wir dazu die DB AG als Beispiel. Die Effekte der Komponentennetze sind direkt darstellbar, wenn das Unternehmen DB AG als Systemverbund betrachtet wird. Dann agiert das Unternehmen als ein Kunde am Markt und muss somit durch die Kombination der kompatiblen und komplementären Systeme

- fahrzeugseitige ETCS-Ausrüstung und
- streckenseitige ETCS-Ausrüstung

die Durchführung eines sicheren und effizienten Schiengüter- und -personenverkehrs gewährleisten (Abbildung 14). Dabei können die beiden komplementären Systemanteile von einem oder von verschiedenen Signaltechnikherstellern bezogen werden.

In diesem Zusammenhang wirken auch die Mechanismen der Marköffnung durch die angestrebte Standardisierung. Die oligopolistischen Marktstrukturen, die in verschiedenen Segmenten der Leit- und Sicherungstechnik vorzufinden sind, werden aufgebrochen und somit entsteht eine neue Wettbewerbssituation. Die Standardkomponenten können von mehreren Herstellern bezogen werden, andererseits können die Hersteller ihre Produkte in einem breiteren Markt absetzen. Die Folge ist die Erwartung der sinkenden Stückkosten einerseits und die Preissenkung aufgrund des Wettbewerbs andererseits.

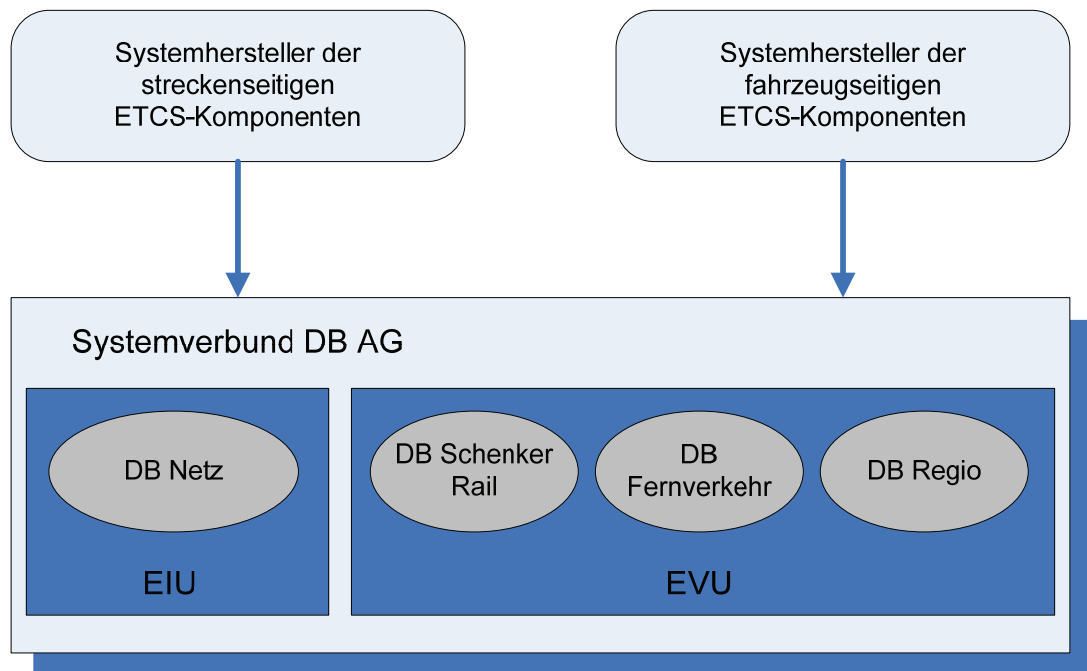


Abbildung 14: Systemverbund DB AG

Sowohl im Rahmen der Kommunikations- als auch der Komponentennetzwerke werden die Netzwerkeffekte im Zusammenhang mit dem erzeugten Nutzen analysiert. Der wirtschaftliche Nutzen ist dabei der dominierende Faktor, da die Unternehmen ihre finanziellen Kennzahlen in den Fokus der Optimierung stellen. Ein weiterer Antrieb kann auch die Abgängigkeit der Alttechnik sein und die damit verbundene Notwendigkeit, eine technische Alternative bereit zu stellen.

Bei den Fragen der betriebswirtschaftlichen Effizienz können grundsätzlich zwei Bereiche betrachtet werden:

- Einnahmeseite
- Ausgabeseite

Abbildung 15 skizziert die hauptsächlichen Nutzenaspekte und die gegenseitige Abhängigkeit zwischen EIU und EVU. Diese sollen im Folgenden beschrieben werden. Diese Nutzenaspekte adressieren eher langfristige Zeiträume – die mit der Ablösung der nationalen Systeme anstehende Migrationsphase erzeugt zunächst einen zusätzlichen finanziellen Aufwand, der insbesondere in den Abschnitten 4.3 und 5 diskutiert wird.

Senkung der Transportkosten

Einer der grundlegenden Nutzenpotentiale der ETCS-Einführung für Eisenbahn-Verkehrsunternehmen ist die Reduktion der notwendigen fahrzeugseitigen Zugsicherungssysteme. Das angestrebte Ergebnis dieses Prozesses ist die Ablösung der kostenintensiven Mehrsystemlokomotiven. Da die Lebenszykluskosten der Zugsicherungssysteme und der Fahrzeuge i. A. eine der Kostenpositionen der im Rahmen der Durchführung des Schienengüter- und -

personenverkehrs bestehenden Transportkosten sind, kann durch die ETCS-Einführung von einer entsprechenden Kostensenkung gesprochen werden. Diese Kostensenkung wird ebenfalls von der steigenden Flexibilität bei dem Einsatz der Fahrzeugflotte unterstützt.

Bei diesem Effekt muss jedoch grundsätzlich zwischen den bereits vorhandenen und sich im Betrieb befindlichen Fahrzeugen einerseits und den geplanten Neuanschaffungen andererseits unterschieden werden.

Optimierung der Fahrzeiten auf internationalen Korridoren

Bei der Optimierung der Fahrzeiten – wobei hier zumeist eine Verkürzung der Fahrzeit angestrebt ist – kann zwischen den Verkehren mit Mehrsystemfahrzeugen und den Verkehren mit dem Tausch der Triebfahrzeuge unterschieden werden. Abhängig von diesen Rahmenbedingungen sind verschiedene Prozesse an den Ländergrenzen notwendig und somit werden auch entsprechende Verzögerungen bzw. Standzeiten erzeugt.

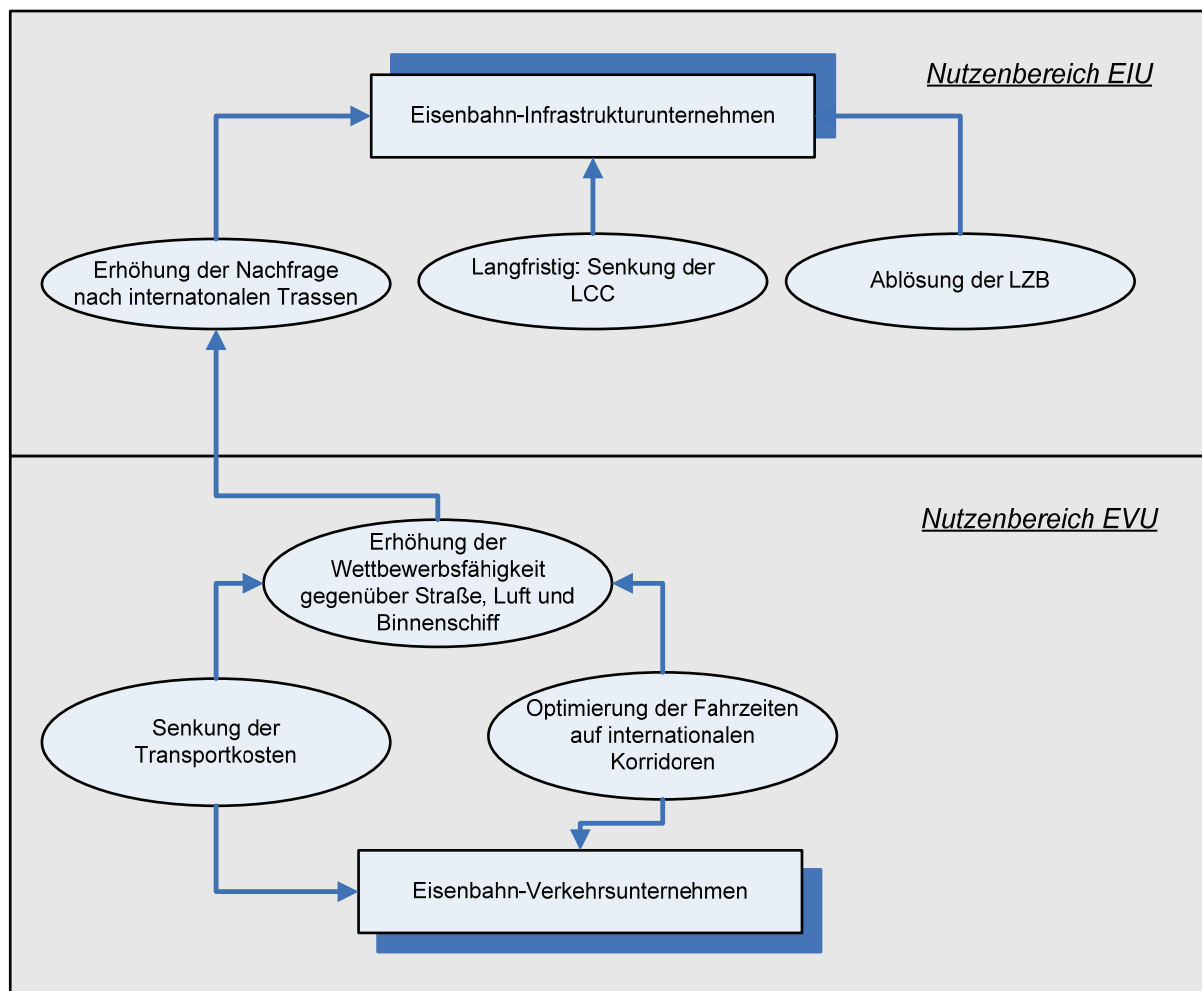


Abbildung 15: Abhängigkeiten der grundlegenden Nutzenaspekte zwischen EIU und EVU

Eine der Konsequenzen aus der oben angesprochenen Erhöhung der Effizienz im Schienenverkehr ist die **Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit** gegenüber den konkurrierenden Verkehrsträgern Straße, Luft und Wasser. Dies hat zu Folge, dass eine Verlagerung der Trans-

porte stattfindet, die in einer **erhöhten Nachfrage nach internationalen Trassen** resultiert. Dieser Effekt kann jedoch nur dann umgesetzt werden, wenn entsprechende Kapazitäten vorhanden sind. Es ist bei Bedarf zu erwarten, dass die Ausrüstung der Strecken mit ETCS durch infrastrukturelle Maßnahmen zur Kapazitätserhöhung begleitet wird.

Senkung der LCC

Bei Ausrüstung konventioneller Strecken des HV-Systems in Deutschland mit ETCS stellt sich in einer Vielzahl von Szenarien kein Vorteil hinsichtlich der betrieblichen Leistungsfähigkeit für das EIU ein. Aus dieser Sicht kann ETCS „lediglich“ als Ersatzinvestition für die PZB90 betrachtet werden [11]. Um aus der Sicht des EIU positive wirtschaftliche Effekte zu generieren, wurde seitens der DB Netz AG ein konventioneller Streckenabschnitt, der auch Bestandteil des Güterverkehrskorridors Rotterdam – Genua ist, auf den Einsatz von ETCS Level 2 ohne Signale untersucht. Anhand dieser Untersuchung auf der Strecke Darmstadt – Mannheim-Friedrichsfeld können in Abhängigkeit der gewählten Ausrüstungsvariante streckenseitige Signale eingespart werden. Verzicht auf die streckenseitige Signalisierung bringt aus der Sicht des Infrastrukturbetreibers signifikante Senkungen von notwendigen Investitionen bei der LST einerseits, andererseits wird der Instandhaltungsaufwand reduziert. Abbildung 16 zeigt im Überblick die im Rahmen der Untersuchung erzielten Ergebnisse im Hinblick auf die Anzahl von Signalen.

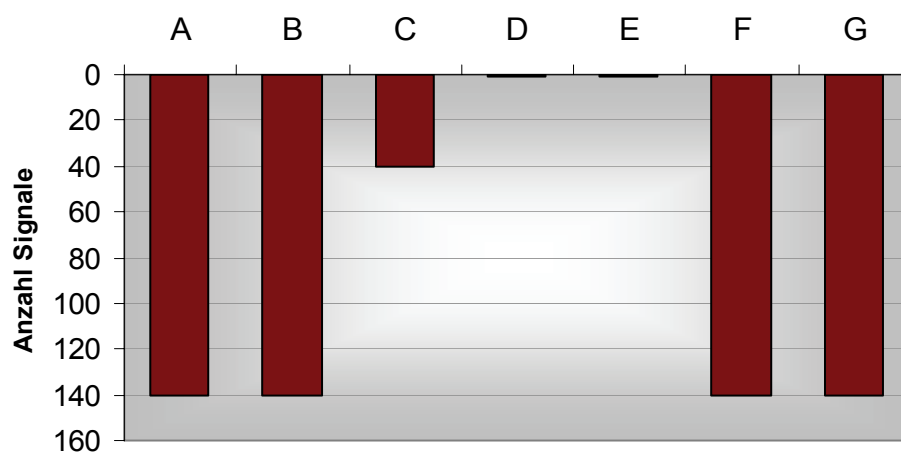


Abbildung 16: Reduzierung von Signalen beim Einsatz von ETCS Level 2 [11]

Nachfolgend sind die einzelnen untersuchten Varianten aufgeführt [11].

Variante A - Weiterführungsfall:

Ausrüstung mit heutiger LST, Signale mit der PZB ausgerüstet

Variante B:

Wie Variante A mit ETCS Level 2

Variante C – ETCS Level 2 mit einer reduzierten Anzahl an Signalen:

Vor- und Hauptsignale als Einfahr- und Ausfahrtsignale für durchgehende Hauptgleise und jeweils ein Überholgleis je Richtung bleiben erhalten. Der Rest entfällt.

Variante D – ETCS Level 2 ohne Signale:

Alle Vor- und Hauptsignale entfallen, an virtuellen Signalstandorten ETCS-Blockkennzeichen, in der Rückfallebene Nutzung GSM-R

Variante E – ETCS L 2 ohne Signale und vereinfachter ETCS Level 1 Limited Supervision:

An virtuellen Signalstandorten ETCS-Blockkennzeichen, an ausgewählten ETCS-Blockkennzeichen schaltbare Balisen und Hilfssignale

Variante F – ETCS Level 1 mit Signalen

Variante G – ETCS Level 1 Limited Supervision mit Signalen

Auf der Seite der Eisenbahn-Verkehrsunternehmen würde eine streckenseitige Ausrüstung mit dem Level 2 ohne Signale und somit auch ohne Parallelausrüstung mit dem nationalen System PZB die Notwendigkeit bedeuten, den betroffenen Teil der Fahrzeugflotte auf ETCS umzurüsten.

Schließlich kann eine geplante **Ablösung eines nationalen Systems** und die damit verbundene Notwendigkeit einer Ersatzinvestition als Nutzenpotential für das EIU genannt werden. In diesem Kontext ist für Hochgeschwindigkeitsstrecken in Deutschland die Ablösung der LZB anzuführen.

Bei allen Investitionsentscheidungen, die im Rahmen der ETCS-Migration von den Bahnunternehmen getroffen werden müssen, werden die Fragen der wirtschaftlichen Effizienz eine entscheidende Rolle spielen. Um die Wirtschaftlichkeit der ETCS-Migration zu verbessern, stellen entsprechende Instanzen auf nationaler und europäischer Ebene Fördermittel zur Verfügung. Die Förderung der streckenseitigen Infrastruktur und somit auch der Leit- und Sicherungstechnik ist unabhängig von der ETCS-Migration eine gängige Praxis. So stellen das EBA und das BMVBS beispielsweise für die Investitionen in die Stellwerkstechnik Bundeshaushaltsmittel zur Verfügung. Neu im Hinblick auf ETCS ist die Tatsache, dass hier auch die Fahrzeugausrüstung – bislang nur als EU-Finanzierung – in Anteilen subventioniert wird und somit ein Anreiz (finanzielle Voraussetzungen) für eine beschleunigte Migration geschaffen wird [31].

Die aktuellen EU-Förderrichtlinien werden im Wesentlichen durch die Verordnung (EG) Nr. 680/2007 des europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2007 über die Grundregeln für die Gewährung für Gemeinschaftszuschüssen für transeuropäische Verkehrs- und Energienetze beschrieben [60].

4.1.2 Vorgehen EU – Entscheidungsgrundlage für das ETCS-Rollout

Um einen fragmentierten Ansatz in Europa zu vermeiden, wurde ein Kern an Eisenbahnprojekten definiert, der eine abgestimmte ETCS-Migration sicherstellen soll. Dabei wurden bei den Projekten sowohl in sich geschlossene als auch projektübergreifende Geschäftsmodelle entwickelt. Die europäische Abstimmung hat ergeben, dass dieser Kern durch eine definierte

und priorisierte Menge von Korridoren innerhalb des Transeuropäischen Netzes (TEN) abgebildet werden soll. Durch diesen Ansatz, der die strategische Ebene der ETCS-Migration beschreibt, sollen folgende Zielstellungen verfolgt werden [27] [58]:

- Schaffen der Voraussetzungen für die Realisierung eines interoperablen europäischen Eisenbahnnetzes mit verbesserten und gänzlich neuen Dienstleistungen und Rahmenbedingungen. Dabei soll die Wettbewerbsfähigkeit des Systems Eisenbahn insbesondere in Wachstumsbereichen – wie dem des internationalen Güterverkehrs – gesteigert werden.
- Fokussierung der internationalen Koordinationsbemühungen sowie der gezielte Einsatz der verfügbaren finanziellen Mittel zur Beschleunigung der ETCS-Einführung und der Generierung von erwarteten positiven Effekten.
- Erreichen einer „kritischen Masse“, so dass das System ETCS als technischer Maßstab und Ausrüstungsstandard für künftige LST-Projekte gilt. Dadurch entsteht für die Signaltechnik-Industrie ein breiter Absatzmarkt, auf dem ein standardisiertes Produkt angeboten werden kann.



Abbildung 17: Das geplante ETCS-Netz / strategische Migration über europäische Korridore / in Anlehnung an [58] [22]

Aus dieser konzeptionellen Überlegung heraus ist der Korridoransatz entstanden. Im Jahr 2005 wurde seitens der verschiedenen Interessensgruppen (Europäische Kommission, UNIFE,

CER, EIM, UIC) ein MoU (Memorandum of Understanding) unterzeichnet. Dieses MoU hat das Ziel, Grundlage für eine strukturierte europäische Verbreitung von ETCS und ERTMS im Wesentlichen auf sechs Frachtkorridoren zu schaffen (Abbildung 17).

Die Korridorbetrachtung in Arbeitsgemeinschaften der beteiligten Infrastrukturunternehmen, Infrastrukturplaner und der Verkehrsministerien – verbunden mit der Koordination auf europäischer Ebene – eröffnet die Möglichkeit, die Entwicklung des Schienengüterverkehrs auch unter Berücksichtigung nationaler Interessen international wettbewerbsfähig auszurichten [61].

Wie bereits dargelegt, werden die Entscheidungen auf der strategischen Ebene der Migration maßgeblich von den europäischen Gremien getroffen. Dabei werden nicht in erster Linie die betriebswirtschaftlichen Interessen einzelner Bahnunternehmen fokussiert, sondern vielmehr der volkswirtschaftliche Nutzen, der im Rahmen der ETCS-Einführung generiert werden kann (Abbildung 18). In dieser Darstellung werden die Umweltaspekte, welche durch die Verlagerung der Transporte auf die Schiene erzeugt werden können, nicht betrachtet.

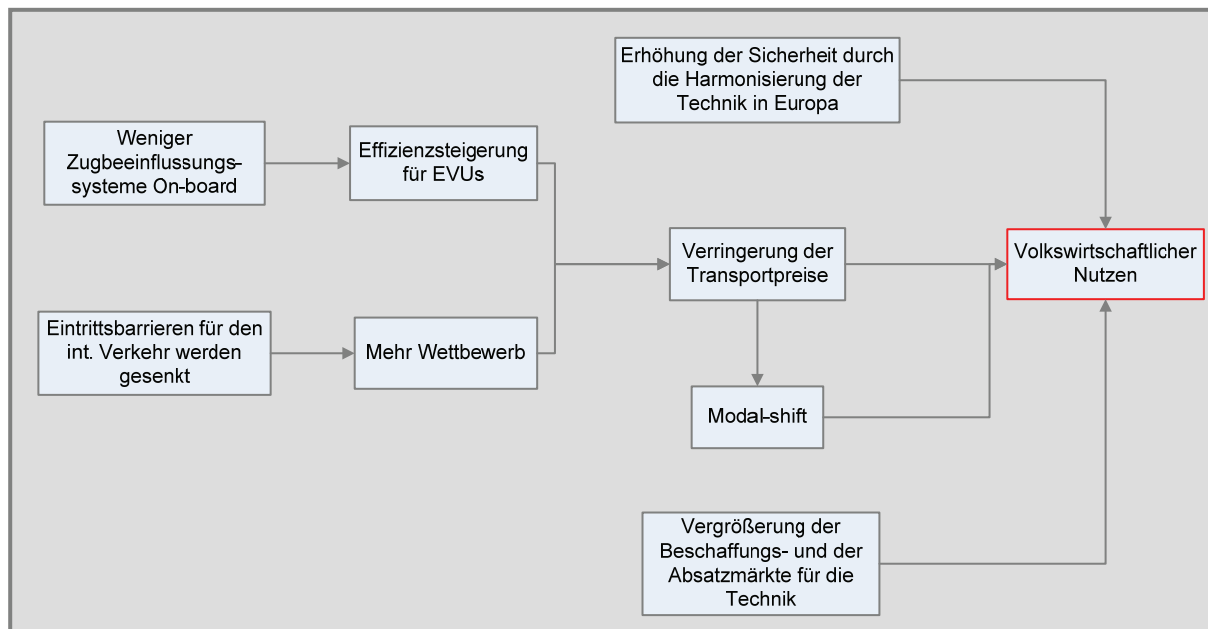


Abbildung 18: Wirkungszusammenhänge bei der Erzeugung des volkswirtschaftlichen Nutzens

Die Einführung eines neuen Standards muss die unterschiedlichen Ausgangslagen der Bahngesellschaften berücksichtigen:

- vorhandene Alttechniken
- kurz- und mittelfristige Investitionspläne
- Umbau- und Neubauvorhaben

Dieses Spektrum an Möglichkeiten variiert von einer Neuausrüstung (keine Alttechnik vorhanden) über Neubau von Hochgeschwindigkeitsstrecken bis hin zum Ersatz oder Ergänzung von vorhandener Alttechnik. Alle diese Maßnahmen lassen sich nicht kurzfristig umsetzen. Sie

bedingen eine Vielzahl von Zwischenschritten, die unter den Interessensgruppen abzustimmen sind.

In dieser strategischen Ebene der ETCS-Migration spielt die Einhaltung und die Pflege der einmal abgestimmten Standards eine zentrale Rolle. Diese müssen nachhaltig gegenüber den stets vorhandenen und sich über die Zeit ändernden national spezifischen Änderungsanforderungen (Change Requests) durchgesetzt werden. Die Eigenschaft einer Vorwärts- und Rückwärtskompatibilität zwischen den verschiedenen Versionen des Standards (Systemspezifikationen SRS) ist ebenso unverzichtbar wie das „Einfrieren“ einzelner Versionen über einen gewissen Zeitraum (Abbildung 19). Dies ist die Mindestvoraussetzung für die Absicherung der Investitionen in ETCS. Die Abbildung zeigt exemplarisch die Beziehungen zwischen den SRS-Versionen 2.2.2., 2.3.0d (debugged) und 3.0.0.

		Fahrzeug			
		Funktionalitäten			
Strecke	Funktionalitäten	2.2.2	2.3.0d	3.0.0	
		2.2.2	✓	?	?
		2.3.0d	✗	✓	✓
		3.0.0	✗	✗*	✓

* Fallweise zu untersuchen / vsl. Softwareanpassung notwendig

Abbildung 19: Vorwärts- und Rückwärtskompatibilitäten der SRS-Versionen [63]

Aus dieser Darstellung wird eine zusätzliche Herausforderung für EVU deutlich, die im grenzüberschreitenden Verkehr aktiv sind. Es gilt in diesem Zusammenhang eine Strategie zu identifizieren, die auf Basis von zeitlichen Restriktionen und der jeweiligen Verfügbarkeit der Produkte am Markt die optimale Fahrzeugausrüstung ermittelt. Aufgrund der oben dargestellten Konstellation bietet die SRS 3.0.0 auf der Fahrzeugseite dabei die besten Voraussetzungen für einen interoperablen Verkehr und wird als solche in den nächsten Jahren (Verfügbar voraussichtlich ab 2013) eine zentrale Rolle in den Fahrzeugbeschaffungs-programmen einnehmen.

4.2 Taktische Ebene der Migration

Die taktische Ebene wird in diesem Kontext als die Migrationsplanung einzelner Korridore, wie beispielsweise die des Korridors A Rotterdam – Genua (Abbildung 20, Seite 51) definiert.

Ein ETCS-Korridor verläuft in der Regel über mehrere Länder und beinhaltet somit Strecken und Streckenabschnitte mit unterschiedlichen Voraussetzungen und Anforderungen an die Migrationsstrategie. Dabei gilt es, einen aus verschiedenen Migrationsstrategien bestehenden und dennoch abgestimmten Migrationsansatz zu entwickeln.

Bei dem Korridor A handelt es sich mit ca. 35 Millionen Tonnen oder 100 Millionen Zugkilometern im Jahr um den Korridor mit dem höchsten Güter-Transportvolumen in Europa. Dieses Volumen wird nach Verkehrsprognosen bis 2020 auf ca. 50 Mio. Tonnen anwachsen. Der Korridor stellt eine wichtige Verbindung zwischen den Industriegebieten in Deutschland und Italien mit den bedeutendsten nord- und südeuropäischen Häfen her [61].

Dabei erweist er sich aufgrund der Länge sowie der geografischen Eigenschaften als Konkurrenzfähig gegenüber den Verkehrsträgern Straße und Wasser. Eine weitere Besonderheit ist die Tatsache, dass der Korridor durch die Schweiz verläuft – das Land, welches sich als nicht EU-Mitglied dennoch bislang sehr stark in der ETCS-Implementierung engagiert hat. Die enge Kooperation zwischen den involvierten Ländern Niederlande, Deutschland, Schweiz und Italien hat den folgenden Ausrüstungsplan auf der taktischen Ebene definiert (Tabelle 3).

Auf diese Weise wird gewährleistet, dass ab 2015 eine durchgängige Befahrung des Korridors mit ETCS möglich ist.

Land	Abschnitt	Zielsystem	Zeit
Niederlande	Betuwe-Route	ETCS L2	2007
	Rangierbahnhof Kijfhoek	Parallelbetrieb ETCS L1 oder L2	2012
	Zevenaar – Emmerich	Parallelbetrieb ETCS L1 oder L2	2012
Deutschland	Emmerich – Oberhausen	Parallelbetrieb ETCS L2, PZB	2015
	Oberhausen – Mannheim	Parallelbetrieb L2/L1 LS mit PZB	2015
	Mannheim – Basel	Parallelbetrieb L2/L1 LS, PZB/LZB	2015
Schweiz	Mattstetten – Rothrist	ETCS Level 2	2007
	Lötschbergtunnel	ETCS Level 2	2007
	Gotthardtunnel	ETCS Level 2	2016
	Rest	ETCS Level 1 LS	2013
Italien	Domodossola/Luino – Gallarte – Busto	ETCS Level 1 + Radioinfill	2013
	Domodossola/Luino– Novara – Genua	ETCS Level 1 + Radioinfill	2013
	Chiasso – Serengo	ETCS Level 1 + Radioinfill	2013
	Serengo – Arquata	ETCS Level 1 + Radioinfill	2015

Tabelle 3: Ausrüstungs- und Zeitplan Korridor A / in Anlehnung an [46]

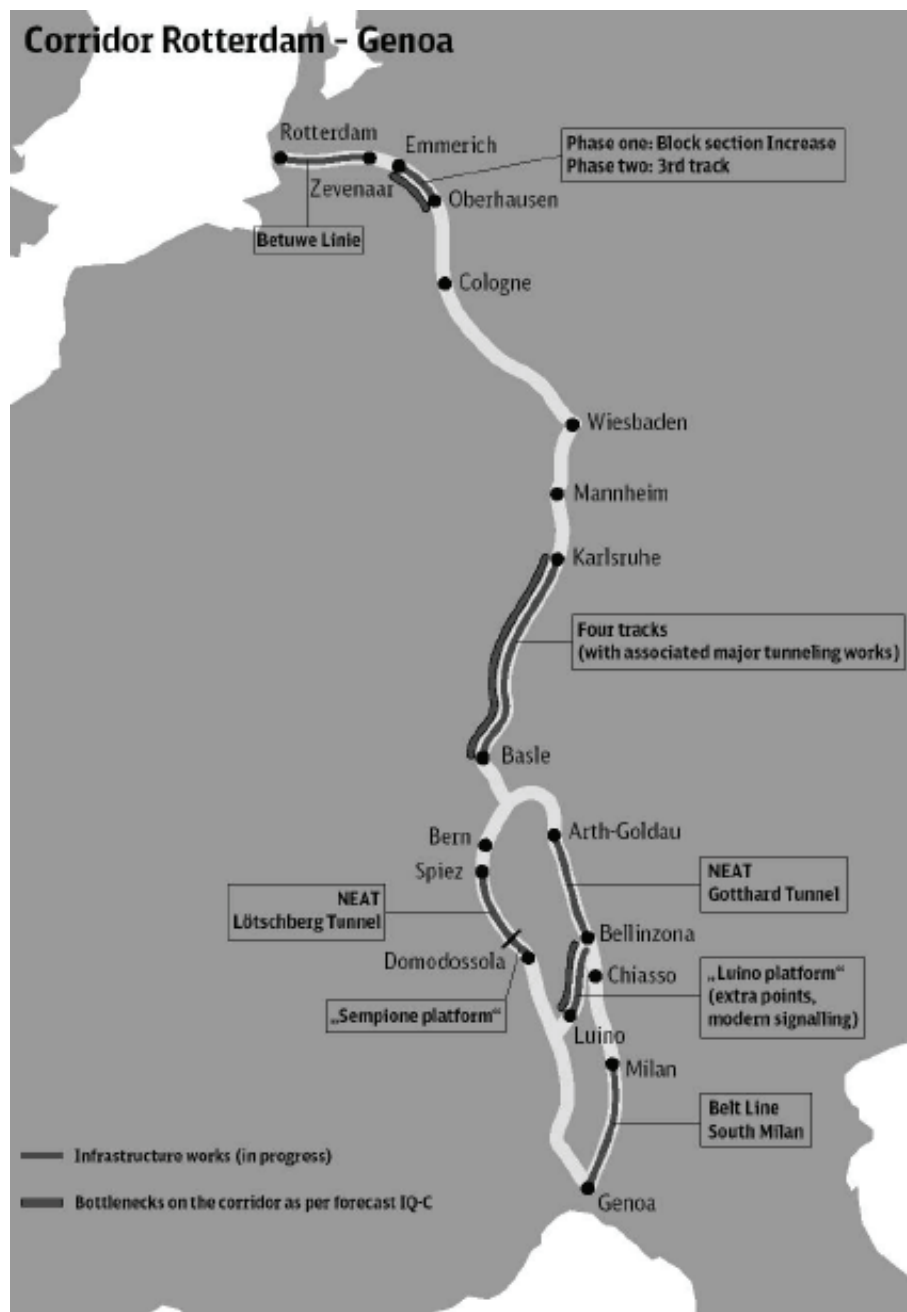


Abbildung 20: Güterkorridor Rotterdam – Genua [22]

4.3 Operative Ebene der Migration

Die Migrationsplanung auf der operativen Ebene behandelt homogene Streckenabschnitte, die beispielsweise innerhalb der Korridore verlaufen und intern ähnliche technisch-betriebliche oder andere für die ETCS-Migration relevante Voraussetzungen bzw. Eigenschaften aufweisen. Die Planung der Migrationsprozesse auf dieser Ebene ist die zentrale Herausforderung für Bahngesellschaften und die Signalbauindustrie.

Während die strategische Ebene durch den starken politischen Einfluss einerseits und die Bestrebung nach Generierung des volkswirtschaftlichen Nutzens andererseits charakterisiert wird und die taktische Ebene auf die internationale Abstimmung fokussiert, entscheidet sich in der

operativen Ebene maßgeblich der betriebliche sowie der unmittelbare finanzielle Effekt für die beteiligten Bahnunternehmen.

Die nicht zuletzt durch die sehr hohe Investitionssumme sowie die Komplexität des Technologiewechsels begründete Notwendigkeit der Entwicklung von effizienten Strategien zur Einführung des einheitlichen europäischen Zugsicherungssystems ETCS war der Anlass zur systematischen Behandlung des Themas Technologiemigration in der Eisenbahndomäne.

4.3.1 Basisstrategien für die ETCS-Migration auf operativer Ebene und ihre Visualisierung

Grundsätzlich können für das System ETCS drei Basisstrategien (unter expliziter Berücksichtigung STM – fünf) formuliert werden, die allerdings zusätzliche Optionen oder Abwandlungen erlauben (Tabelle 4).

		Fahrzeuge		
		Umrüstung vom nationalen System zu ETCS	Parallelausrüstung	
			ETCS + nationales System	ETCS + STM
Strecke	Umrüstung vom nationalen System zu ETCS	Nicht umsetzbar	Strategie 2	Strategie 2'
	Parallelausrüstung nationales System + ETCS	Strategie 1	Strategie 3	Strategie 3'

Tabelle 4: Basisszenarien für die ETCS-Migration

Eine wesentliche Anforderung an die Migrationsstrategien ist die Aufrechterhaltung vom Bahnbetrieb in der Übergangsphase. Aufgrund der fehlenden Kompatibilität zu den nationalen Zugbeeinflussungssystemen einerseits und dem Grundsatz der verteilten Funktionsallokation auf die Strecke und das Fahrzeug andererseits, ist bei der ETCS-Migration eine zumindest zeitweise Parallelausrüstung notwendig. Deswegen ist eine einfache Umrüstung der beiden Systemanteile Strecke und Fahrzeug vom nationalen System zu ETCS – zumal dieser Prozess eine relativ lange Zeit in Anspruch nimmt – keine Option im Strategieraum der operativen Ebene der Migration. Die Konstellation weist eine Inkompatibilität auf und verletzt somit die Randbedingung der Aufrechterhaltung des Betriebes während der Migration.

Ein wichtiger Parameter für die Abwicklung der Szenarien ist die Ermittlung der von dem Migrationsprozess auf der jeweiligen Strecke betroffenen Fahrzeuge. Diese Größe skaliert die Migrationskosten in einem wesentlichen Maße.

Für die Visualisierung von Migrationsstrategien bieten sich aufgrund der zeitlichen sowie der technologischen Systemabhängigkeit verschiedene Darstellungsformen an. In dieser Arbeit werden zwei Darstellungsmöglichkeiten eingesetzt:

- Roadmapping für die Visualisierung der Zustände, Migrationsschritte und -pfade
- Liniendiagramme für die Visualisierung der Mengengerüste im Zeitablauf

Aufgrund der Berücksichtigung der zeitlichen Entwicklung und der Beziehungen zwischen den Objekten einer Roadmap liegt es nahe, Roadmapping bei der Planung von Systemmigrationen anzuwenden. Beim Roadmapping wird versucht, einen durch Szenarien festgelegten Zustand zu erreichen, in dem in einem Knoten-Kanten-Modell ausgehend vom Ist-Zustand verschiedene mögliche Wege entwickelt werden. Auch bei der Migration von technischen Systemen werden Wege gesucht, einen definierten Zielzustand zu erreichen. In beiden Fällen müssen wichtige Randbedingungen und Beziehungen der beteiligten Objekte oder Systemzustände berücksichtigt und im Zeitverlauf dargestellt werden [47].

Abbildung 21 zeigt exemplarisch drei Basisszenarien und zusätzlich das STM-Szenario für den Übergang von der punktförmigen Zugbeeinflussung auf Basis der elektromagnetischen Induktion Indusi (induktive Zugsicherung) zum ETCS Level 1.

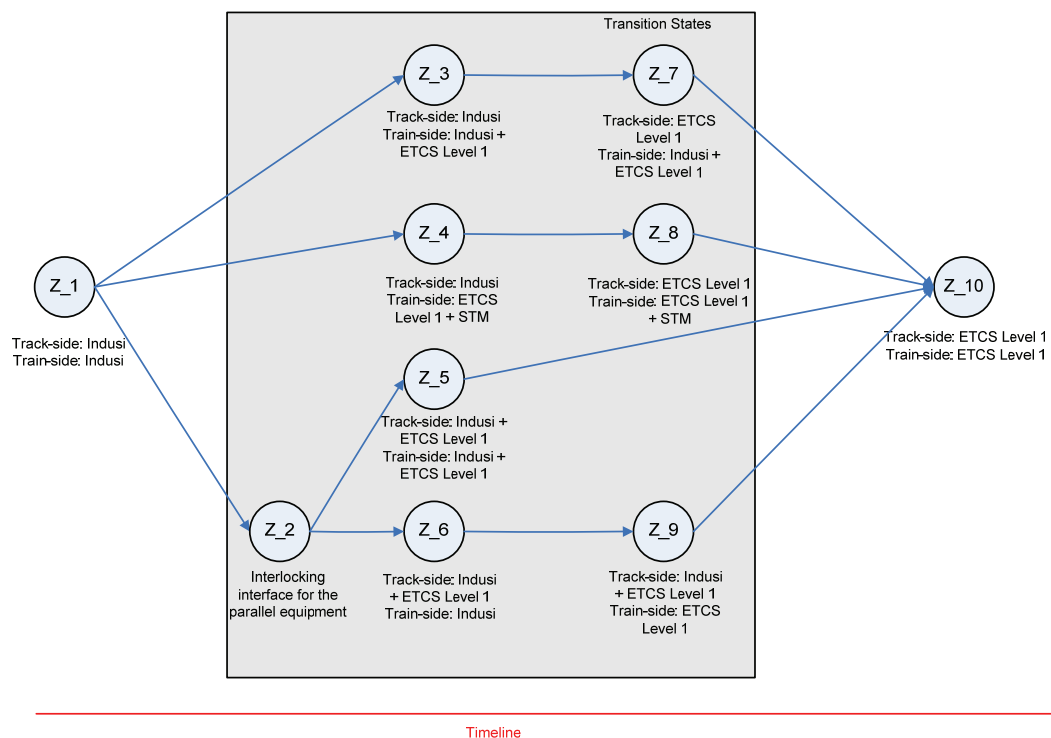


Abbildung 21: Basis-Migrationspfade für den Übergang von der Indusi zum ETCS Level 1 [39]

Dabei entsteht ein Knoten-Kanten-Modell, das als „Migrationsroadmap“ zum Verdeutlichen der Migrationprozesse verwendet werden kann. Wenn die Kanten des Modells mit Kosten bzw. Zeiten gewichtet werden, können die beiden Kenngrößen – Gesamtdauer und Migrationskosten – für die Bewertung von Migrationsszenarien ermittelt werden.

Sollen neben den Zuständen und ihren Übergängen auch die konkreten Mengengerüste der strecken- sowie der fahrzeugseitigen Ausrüstung dargestellt werden, bietet sich die Anwendung der Liniendiagramme an.

Abbildung 22 bis Abbildung 25 zeigen exemplarisch, vier durch das im Rahmen dieser Forschungsarbeit entwickelte Softwarewerkzeug für die Bewertung von Migrationsstrategien generierte Darstellungen der ETCS-Basisstrategien unter der Randbedingung, dass am Ende der Migrationsdauer das nationale System strecken- und fahrzeugseitig vollständig durch ETCS abgelöst worden ist. Das Ziel der Migration ist somit eine Ausrüstung lediglich mit dem System ETCS sowohl strecken- als auch fahrzeugseitig (s. auch Abbildung 21). Es werden dabei die sich im Laufe des Prozesses verändernden Bestände an strecken- und fahrzeugseitigen aktuellen bzw. Zielsystemen dargestellt. Es handelt sich hierbei um einen hinsichtlich der Migration homogenen Streckenabschnitt bzw. Strecke.

Im Folgenden werden die Basisstrategien unter der o. g. Maßgabe des Zielzustands beschrieben.

Strategie 1: Streckenseitige Parallelausrüstung

Im Rahmen dieser Strategie wird zunächst die Strecke neben dem nationalen System zusätzlich mit ETCS ausgerüstet. Wenn dieser Teilprozess abgeschlossen ist, werden die von der Migration betroffenen Fahrzeuge umgerüstet. Das bedeutet, dass das alte nationale System fahrzeugseitig schrittweise durch das neue System ETCS ersetzt wird. Da die Strecke mit beiden Systemen ausgerüstet ist, können sowohl die Fahrzeuge mit dem alten als auch die mit dem neuen System darauf verkehren. Wenn die Umrüstung der Fahrzeuge abgeschlossen ist, kann das alte System von der Strecke zurückgebaut werden. Somit wird eine dauerhafte Parallelausrüstung und damit auch die Instandhaltung zweier Systeme vermieden.

Abbildung 22 zeigt die Verteilung der Bestände von Systemen

- alt (nationales Zugbeeinflussungssystem) und
- neu (ETCS)

fahrzeug- und streckenseitig.

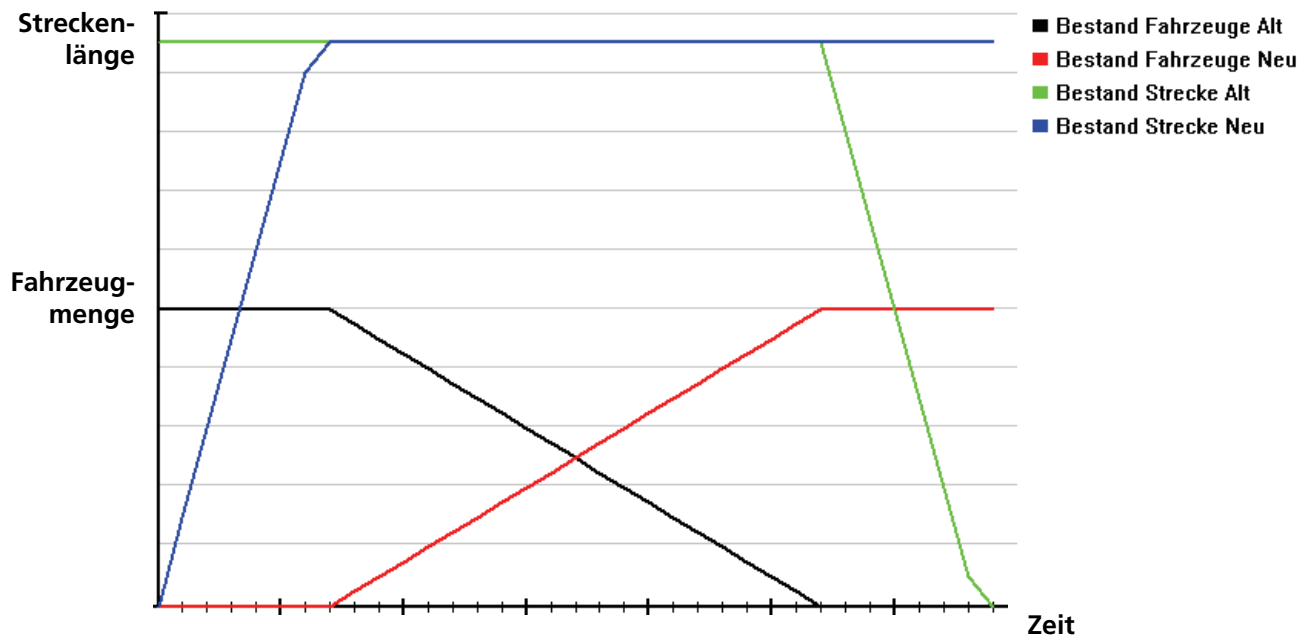


Abbildung 22: Grafische Darstellung ETCS-Migration - streckenseitige Doppelausrüstung

Diese Strategie kann abgewandelt werden, insofern dass das nationale System auf der Strecke nicht zurückgebaut wird. Dies widerspricht der oben definierten Maßgabe, stellt jedoch eine gängige Praxis dar. Eine dauerhafte Instandhaltung von zwei Systemen wird dabei in Kauf genommen, um ETCS nicht als Netzzugangskriterium deklarieren zu müssen und so den EVU die zeitliche Flexibilität für die Migration zu nehmen. Ein ähnlich strukturiertes Anwendungsszenario findet sich im ersten Teil der Fallstudie im Kapitel 5.4 wieder.

Strategie 2: Fahrzeugseitige Parallelausrüstung

Bei der fahrzeugseitigen Parallelausrüstung wird zunächst die von der Migration betroffene Fahrzeugflotte parallel zu dem bestehenden System bzw. bestehenden Systemen zusätzlich mit ETCS ausgerüstet. In einem nächsten Schritt kann streckenseitig die Ausrüstung mit dem nationalen Zugsicherungssystem durch ETCS-Komponenten ausgetauscht werden. Da die Fahrzeuge über beide Systeme verfügen, können sie sowohl die Streckenabschnitte mit dem alten als auch die mit dem neuen System nutzen. Nachdem die relevanten Strecken vollständig auf ETCS umgerüstet sind, kann das alte nationale System von den Fahrzeugen schrittweise deinstalliert werden. Der Hintergrund des Rückbaus im letzten Teilprozess ist analog zu der oben beschriebenen Strategie der streckenseitigen Doppelausrüstung die Kostensenkung in der Instandhaltung. Die Effekte (Instandhaltungskosten) werden jedoch auf der Fahrzeugseite niedriger eingeschätzt.

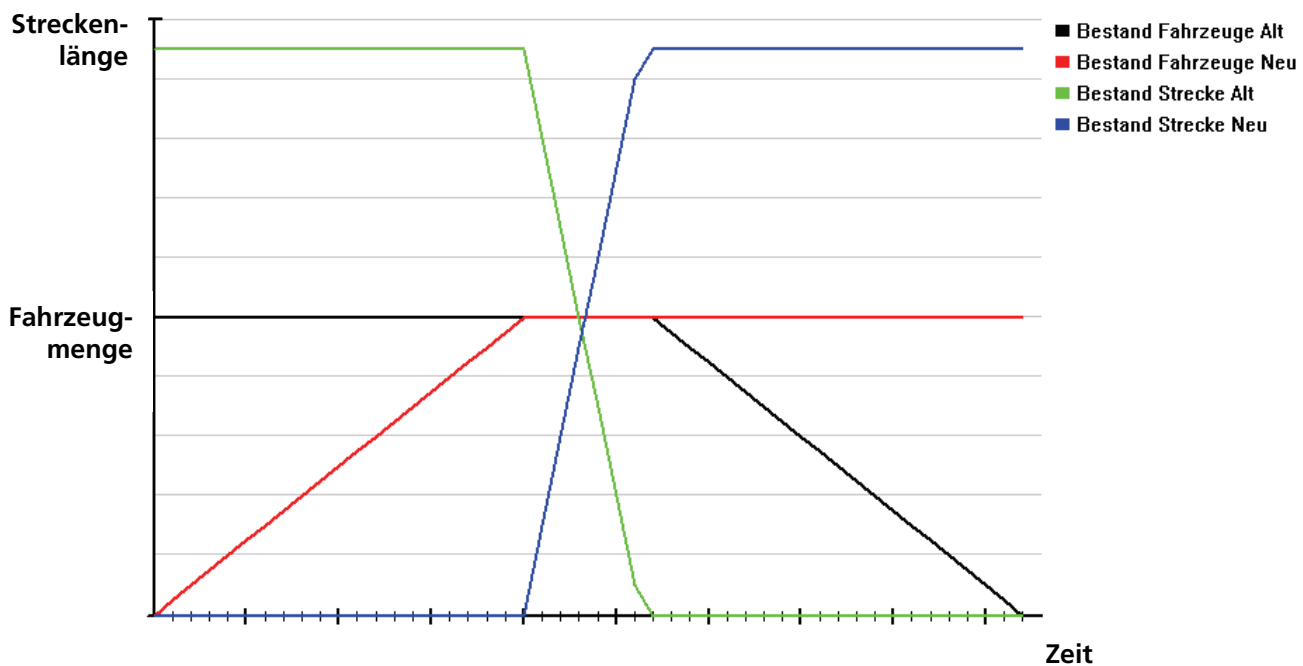


Abbildung 23: Grafische Darstellung ETCS-Migration - fahrzeugseitige Doppelausrüstung

Strategie 3: Beidseitige Parallelausrüstung

Die Anwendung dieser Strategie dient in erster Linie zur Verkürzung der Migrationsdauer. Zu Beginn der Migration werden sowohl die Streckenabschnitte als auch die Fahrzeugflotte mit beiden Systemen ausgerüstet. Somit sind die Einsatzflexibilität der Fahrzeuge sowie die Befahrbarkeit der Strecken gegeben. Zusätzlich verringert sich die Migrationsdauer, andererseits steigen durch die beidseitige Vorhaltung von zwei Systemen in der Regel die Instandhaltungskosten.

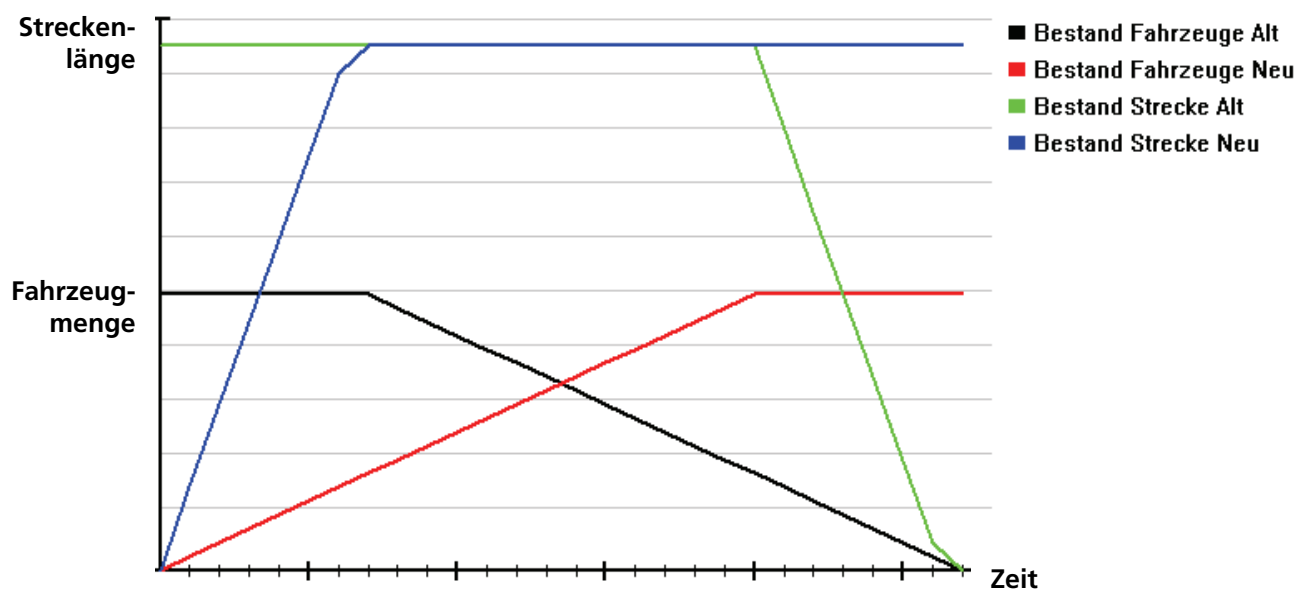


Abbildung 24: Grafische Darstellung ETCS-Migration - beidseitige Doppelausrüstung

Strategie 2' und 3': STM-Strategie

STM (Specific Transmission Module) ist eine On-board Einheit, die zur Übersetzung der nationalen streckenseitigen Informationen in ETCS-Telegramme dient. So kann ein Fahrzeug, welches das EVC und ein entsprechendes nationales STM hat, sowohl über ETCS-Strecken als auch über die noch mit dem nationalen System ausgerüsteten Streckenabschnitte verkehren. Der Ablauf der Migration ist weitgehend dem der fahrzeugseitigen Doppelausrüstung analog, lediglich kommt es im ersten Abschnitt zu der Doppelausrüstung mit ETCS und dem STM, wobei theoretisch gleichzeitig das nationale System deinstalliert wird. Praktisch wird ein STM in der Regel bei der Neubeschaffung von Fahrzeugen eingesetzt. Ein Vorteil dieser Strategie ist die Möglichkeit zur so genannten dynamischen Transition – dem Übergang zwischen zwei Systemen während der Fahrt. Nachteilig wirkt sich die Tatsache aus, dass hier ein technisches System entwickelt wird, das nach dem Ablauf der Migration (zumindest unter der o. g. Voraussetzung der Zielsystemdefinition) überflüssig wird [30].

Im Rahmen der STM-Strategie ist neben der in Abbildung 25 dargestellten Konstellation der Umrüstung der streckenseitigen Infrastruktur auf ETCS auch eine Doppelausrüstung der Strecken anwendbar.

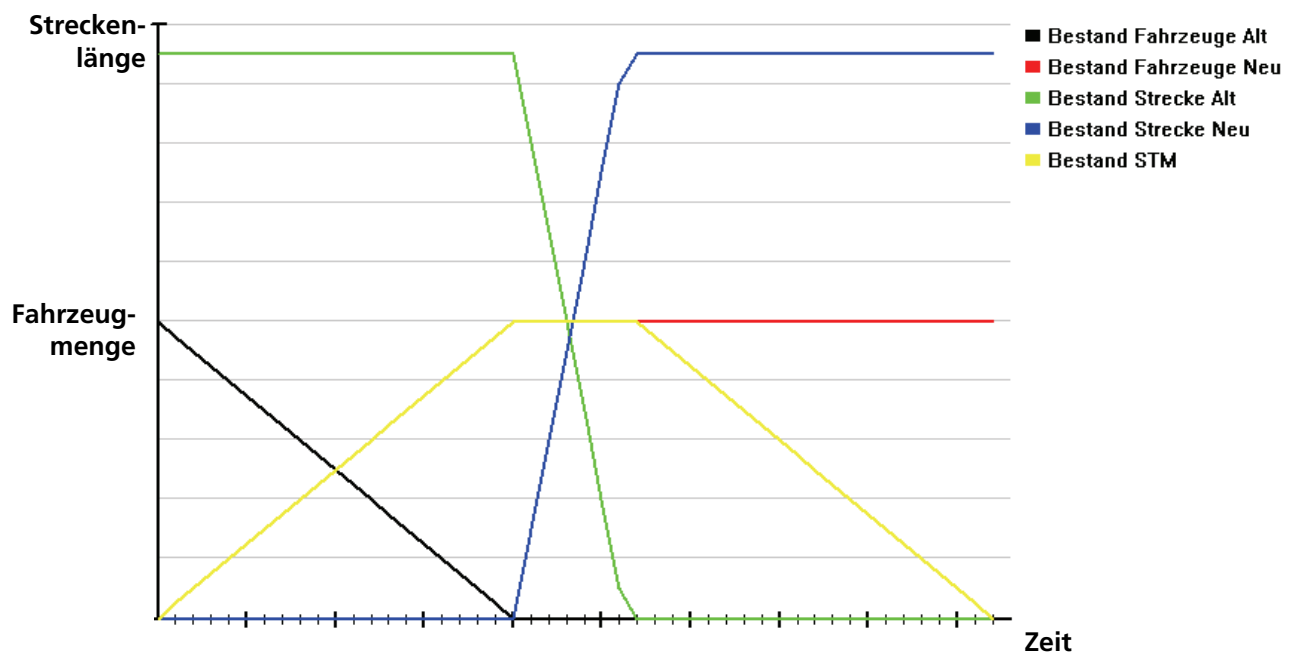


Abbildung 25: Grafische Darstellung ETCS-Migration - STM-Strategie

Inverse STM-Strategie – ETM (Eurobalise Transmission Module)

Als Beispiel einer abgewandelten Strategie soll hier das „Schweizer-Modell“ angeführt werden. In der Schweiz wurde ein anderer Migrationsansatz gewählt, bei dem die existierende Fahrzeugflotte zusätzlich zu den nationalen Systemen mit dem ETM ausgerüstet wurde. Somit sind die Fahrzeuge für den Betrieb auf den ETCS-Streckenabschnitten befähigt. Anschließend erfolgt eine Umrüstung der Streckeninfrastruktur von den nationalen Sicherungssystemen ZUB und SIGNUM auf ETCS, so dass ab einem bestimmten Zeitpunkt die neu zu beschaffenden Fahrzeuge nur noch mit ETCS bestellt werden können [37] [54].

Wie bereits oben angedeutet, können diese Basisstrategien von dem Investitions- bzw. Beschaffungsprogramm hinsichtlich der Fahrzeuge sowie insbesondere durch die Entscheidungen für oder gegen den Rückbau der Altsysteme abgewandelt werden. Dabei wird häufig aufgrund der betrieblichen Flexibilität auf den Rückbau der streckenseitigen nationalen Altsysteme verzichtet (beispielsweise auf dem deutschen Teil des Korridors Rotterdam – Genua). In diesen Fällen ist der Migrationsprozess bzw. sein Ende anders zu definieren:

- freie Definition der Ziele (z. B. Beibehaltung der Altsysteme an der Strecke und an definierten Fahrzeugen)
- Erreichen der Interoperabilität auf der Streckenseite
- fahrzeugseitige Interoperabilität für den grenzüberschreitenden Verkehr

Abhängig von den Zielen können die Strategien individuell entwickelt werden (s. dazu auch 5.4)

4.3.2 Alternativkonzept der Basisstrategien anhand der Triggerfunktion für die Migration

Schroeder [9] behandelt die Themenstellung der Entwicklung von Migrationsstrategien aus der Sicht der Triggeraktivität für die Umrüstung. Dabei unterscheidet er grundsätzlich zwei Optionen (s. auch Tabelle 5):

Streckenorientierte Umrüstung

Hierbei handelt es sich um die so genannte „natürliche Migration“ der Streckenseite. Die Umrüstung auf ETCS richtet sich nach der Abgängigkeit der Streckenausrüstung. Diese Strategie erfordert – je nach Zeitpunkt – alle drei Fahrzeugumrüstungstypen (s. unten). Bei diesem Vorgehen stehen den Investitionen auf der Infrastrukturseite – die durch die Abgängigkeit der alten LST ohnehin notwendig sind – die durch den LCC-Vergleich erwarteten Einsparungen gegenüber. Diese LCC-Einsparungen werden aufgrund des höheren Wettbewerbs im Markt sowie der Skaleneffekte erwartet.

Die Migrationskosten auf der Fahrzeugseite errechnen sich durch den Vergleich der Kosten des Planungs- / Migrationsszenarios mit den Kosten des Weiterführungsszenarios. Diese Migrationskosten werden somit insbesondere von den Nachrüstungen der vorhandenen Fahrzeuge determiniert, da diese Kostenposition im Planungs- aber nicht im Weiterführungsszenario anfällt. Hier müssen noch die Opportunitätskosten für den entgangenen Nutzen während der Fahrzeugumrüstung berücksichtigt werden. Kosten für integrierte Systeme werden als nur unwesentlich höher als die Kosten für die reine ETCS-Ausrüstung der Fahrzeuge angenommen, da viele Komponenten für beide Systeme gemeinsam genutzt werden können.

Diese Strategie ist zusammen fassend nach Schroeder nur dann wirtschaftlich vertretbar, wenn die Einsparungen im Bereich der Infrastruktur die Migrationsmehraufwände der Fahrzeugseite übersteigen. Dafür sollen auch verschiedene Förderungsarten wie zinsloses Darlehen, BKZ (Baukostenzuschüsse) oder Einzelvereinbarungen berücksichtigt werden.

Fahrzeugorientierte Umrüstung

Im Rahmen dieser Strategie wird das Beschaffungsprogramm der Fahrzeuge als Treiber für den Migrationsprozess definiert. Eine abgängige LST auf einer bestimmten Strecke wird nur dann auf ETCS umgerüstet, falls entsprechend dem Produktionskonzept und dem Investitionsprogramm der EVU bis zu dem Zeitpunkt genügend ETCS-Fahrzeuge vorhanden sind. Andernfalls wird der nächste Erneuerungszyklus (+20 Jahre) abgewartet.

Dieser Ansatz scheint aufgrund der langen Zeiträume und der Konstellation mit unterschiedlichen Investitions- und Produktionsprogrammen der verschiedenen EVU problematisch (s. auch *Diskussion des Ansatzes*). Im Vergleich zur ersten Strategie wird hier eine Reduktion der Migrationskosten der EVU um die Kosten für die Umrüstung der vorhandenen Flotte realisiert.

Zusätzlich werden noch zwei Abwandlungen dieser Optionen dargestellt:

Streckenseitige Doppelausrüstung

Durch die streckenseitige Doppelausrüstung – die im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine der Basisstrategien darstellt (Abschnitt 4.3.1) – soll eine Flexibilisierung der Fahrzeugausrüstung in der Migrationsphase erreicht werden. Diese Doppelausrüstung wird nur temporär vorgehalten, der Mehraufwand wird in erster Linie beim EIU in Form der erhöhten Instandhaltungskosten generiert. Die EVU können dabei die Anzahl der integrierten Fahrzeuge minimieren.

Vorzeitige streckenseitige Ersatzinvestition

Diese Strategie erlaubt – trotz des Restbuchwertes der Streckenausrüstung – eine vorzeitige Umrüstung vom nationalen System auf ETCS. Die Umrüstung wird zu dem Zeitpunkt eingeleitet, wenn genügend Fahrzeuge mit ETCS vorhanden sind. Die Frage nach dieser kritischen Masse wird in [9] nicht beantwortet.

Im Rahmen dieser Strategien werden auf der Fahrzeugseite drei unterschiedliche – von dem Investitions- sowie dem Produktionskonzept der Verkehrsunternehmen in ihrem jeweiligen Umfang abhängige – Aktivitäten unterschieden:

Nachrüstungen von bestehenden Fahrzeugen

Dies ist insbesondere bei Fahrzeugen sinnvoll, die eine ausreichend lange Restlebensdauer aufweisen.

Bestellen / Ausrüsten der Neufahrzeuge mit einer integrierten (Doppel-)Ausrüstung

Dies ist insbesondere am Anfang und während einer langen Migrationsphase sinnvoll.

Bestellen / Ausrüsten der Neufahrzeuge nur mit ETCS

Dieses Vorgehen wird zumeist zum Ende der Migration bzw. beim Sicherstellen der Interoperabilität angewendet.

Bei der Ermittlung der Fahrzeugmenge können auf Basis des Produktionskonzepts des jeweiligen EVU zwei grundsätzliche Vorgehensweisen unterschieden werden:

- Linientreue Umrüstung

Fahrzeuge werden liniengetreu lediglich auf bestimmten Strecken / Korridoren eingesetzt.

- Flexible Einsatzplanung

Fahrzeuge sollen im gesamten Netz eingesetzt werden können.

Die Grundzüge der Entwicklung der jeweiligen Migrationsstrategien nach Schroeder

Es gelten folgende Randbedingungen: [9]

- Von der Einführung der neuen LST sind bestimmte Strecken innerhalb des gesamten Netzes betroffen.
- Die Umrüstung der Strecken muss von einer Untermenge an verschiedenen EVU aus der Gesamtmenge der Verkehrsunternehmen berücksichtigt werden.
- Gemäß dem Produktionskonzept soll die Umlaufplanung und somit auch die Menge an Fahrzeugen ermittelt werden, die von dem Migrationsprozess betroffen sind.
- Wenn eine permanente Doppelausrüstung streckenseitig als Strategie gewählt wird (oder Klasse B System in der Rückfallebene), dann sind nur die EVU / Fahrzeuge betroffen, welche die neuen Leistungsmerkmale nutzen wollen.
- Die Streckenkapazität in der Rückfallebene sinkt ggf. – das EIU hat deswegen das Interesse, dass EVU das neue System nutzen und so die maximale Streckenleistungsfähigkeit erreichen.

Tabelle 5 stellt die Grundzüge dieser Strategien im Bezug auf die einzelnen Aktivitäten als mögliche Kostentreiber der Migrationskosten zusammen.

	Streckenorientierte Umrüstung	Fahrzeugorientierte Umrüstung	Streckenseitige Doppelausrüstung	Vorzeitige streckenseitige Ersatzinvest.
Nachrüstung bestehender Fahrzeuge	+++	Fällt bei dem EVU weg, dessen Investitionsprogramm die Triggerfunktion übernimmt	Können evtl. entfallen. Das ist von dem Investitionsprogramm abhängig.	Fällt weg
Bestellen von Neufahrzeugen / integrierte Lösung	++	++	+	+
Bestellen von Fzg. nur ETCS	+	+	+	+
Auswirkungen auf die Streckenseite	? „Natürliche“ Migration der Streckenseite hinsichtlich der Zugbeeinflussung. STW-Technik muss beachtet werden.	+	++	++
		Von dem Investitionsprogramm der EVU abhängig. Problematisch aufgrund der langen Lebenszyklen der Strecken-LST.	Zwei Systeme müssen über einen gewissen Zeitraum vorgehalten werden.	Baukostenzuschüsse müssen vsl. Gemäß dem Restbuchwert der Anlagen zurückgezahlt werden.

Tabelle 5: Kostentreiber der ETCS-Migration / in Anlehnung an [9]

Dabei ist die Einflussstärke auf die Migrationskosten wie folgt zu interpretieren:

- +++:** determiniert die Migrationskosten im hohen Maße, da diese Aktivität im Weiterführungsszenario nicht vorhanden
- ++:** determiniert die Migrationskosten im mittleren Maße, da Kosten der integrierten Lösung unwesentlich höher als nur ETCS
- +**: determiniert die Kosten in niedrigem Maße, da nur LCC-Vergleich zu den Kosten des Altsystems
- ?:** kann nicht eindeutig bestimmt werden

Diskussion des Ansatzes

Sowohl strecken- als auch fahrzeugorientierte Umrüstung ist so definiert, dass lediglich die Fahrzeuge und nicht einzelne Strecken parallel mit dem Klasse B System und ETCS ausgerüstet werden. Problematisch bei dieser Betrachtung ist die genaue Definition der fahrzeugorientierten Umrüstung mit ihrer Vermeidung der Nachrüstung von bestehenden Fahrzeugen. Gerade in dem für die ETCS-Einführung besonders relevanten Segment des internationalen

Schienen Güterverkehrs ist die Liberalisierung des Marktes bereits weit voran geschritten. Dies bedeutet, dass auf dem Netz eines EIU mehrere signifikante EVU verkehren. Die Strategie der fahrzeugorientierten Umrüstung definiert das Investitionsprogramm des EVU als Trigger für den Beginn der streckenseitigen Umrüstung. Da ein einheitliches und untereinander abgestimmtes Investitionsprogramm aller EVU nicht vorausgesetzt werden kann, ist diese Strategie lediglich aus der Sicht *eines* ausgewählten Verkehrsunternehmens zu verstehen. Um den Netzzugang nicht zu beschränken, wird sich seitens des Infrastrukturbetreibers eine Doppelausrüstung nicht vermeiden lassen.

Bei der Strategie der **Streckenorientierten Umrüstung** wird die technische Abgängigkeit der streckenseitigen Zugbeeinflussung als Trigger für die „*Natürliche Migration*“ definiert. Problematisch an dieser Stelle ist die fehlende Betrachtung der Stellwerkstechnik, die aber aufgrund ihres hohen Investitionsbedarfs die ETCS-Migration stark beeinflussen kann (s. dazu auch die Fallstudie in den Abschnitten 5.4 und 6.1).

Im Rahmen der Strategie **Vorzeitige Streckenseitige Ersatzinvestition** wird die zentrale Frage der kritischen Masse an umgerüsteten Fahrzeugen nicht beantwortet. Diese Problemstellung erfordert für ihre abschließende Lösung aufgrund der hohen Komplexität eine eigenständige wissenschaftliche Arbeit, die auf Basis der vorhandenen Ansätze eingeleitet werden kann.

Aufgrund der Komplexität des Themas Migration der Eisenbahn-LST und insbesondere ETCS werden in [9] – wie auch in der vorliegenden Arbeit – bestimmte Aspekte nicht berücksichtigt bzw. vernachlässigt. Somit werden Felder für künftige weitere Entwicklungen im wissenschaftlichen Umfeld erzeugt.

4.4 Kopplung der taktischen mit der operativen Ebene der Migration

Bei der Betrachtung der in der Praxis vorzufindenden zusammenhängenden Streckenabschnitte bzw. Strecken, die zu Korridoren zusammen gefasst werden, erhöht sich die Komplexität der Fragestellung, da hier zwei der zuvor dargestellten Ebenen der Migrationsfragestellung miteinander gekoppelt und abgestimmt werden müssen.

Für die Klassifizierung der Streckenabschnitte muss als erstes der zu untersuchende Korridor in seinem Verlauf analysiert werden. Um die dabei auftretende Komplexität handhaben zu können ist es sinnvoll, den Korridor in solche Streckenabschnitte zu unterteilen, die in sich eine Homogenität hinsichtlich der grundlegenden migrationsrelevanten Eigenschaften aufweisen (Abbildung 26) [29].

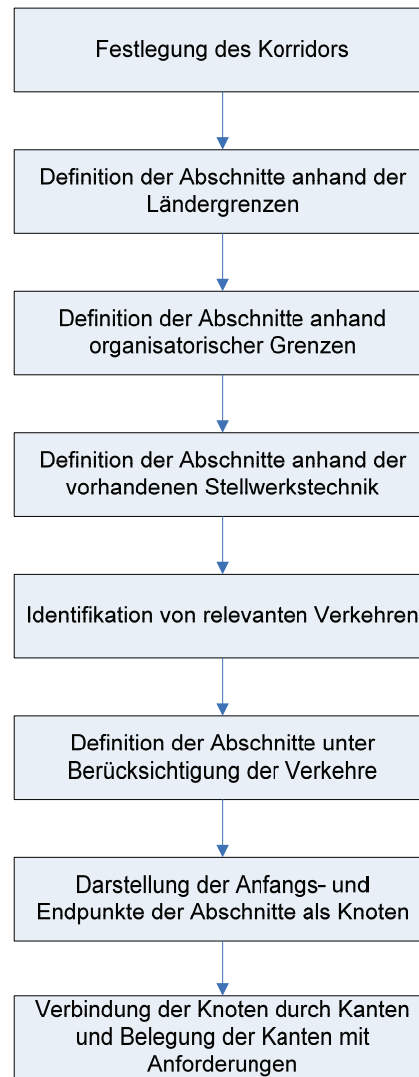


Abbildung 26: Definition von Streckenabschnitten innerhalb der Korridore, in Anlehnung an [29]

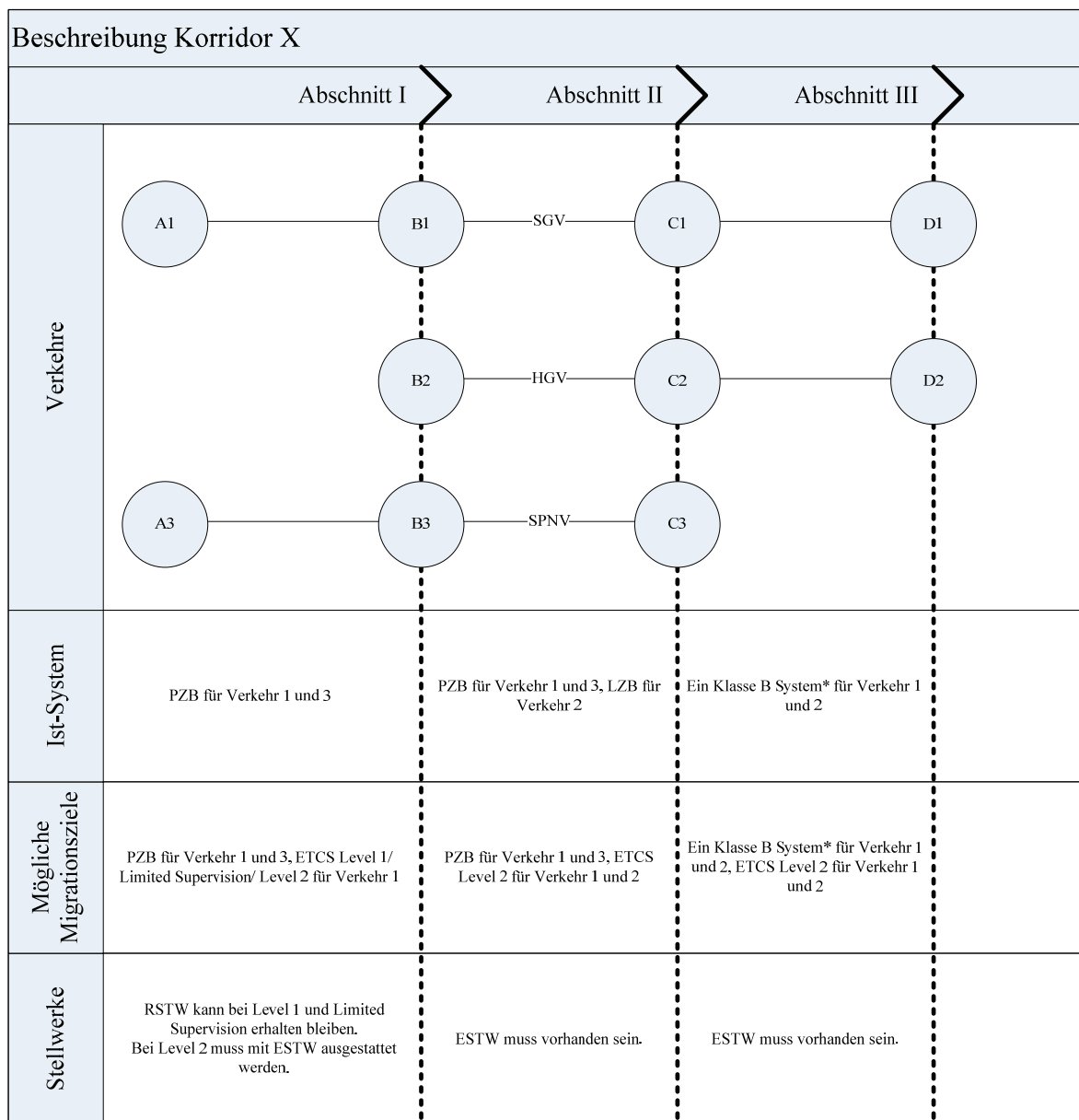
Eine erste, äußerst wichtige Unterteilung wird anhand der Staatsgrenzen vorgenommen. Daraus können zunächst die nationalen Zugbeeinflussungssysteme ermittelt werden, die auf den Abschnitten vorhanden sind. Außerdem kann so berücksichtigt werden, ob ein Verkehr Ländergrenzen passiert oder nicht. Streckenabschnitte sollten dann detaillierter anhand betrieblicher und organisatorischer Bereiche innerhalb der jeweiligen Länder gebildet werden. Mit diesen ersten beiden Schritten ist auch die Basis für eine für die Migration unbedingt notwendige korridorbezogene Koordination sichergestellt. Des Weiteren ist eine Betrachtung der vorhandenen Stellwerkstechnik und der eventuell diesbezüglich geplanten Investitionen durchzuführen. Auf der letzten Gliederungsebene wird eine Einteilung vorgenommen, die sich an Zu- und Abflüssen von wesentlichen – bei der ETCS-Migration relevanten – Verkehren orientiert. Diese Zu- und Abflüsse sollen nur an Grenzen zwischen zwei Abschnitten möglich sein – die Abschnitte sind demnach entsprechend zu dimensionieren.

Sind die Abschnitte so gewählt, dass sich die oben genannten Eigenschaften nur an den Grenzen der Abschnitte ändern, können die dazwischen liegenden Strecken als homogen hinsichtlich der grundlegenden Migrationsanforderungen angesehen werden. Dies bedeutet,

dass hier abschnittsweise bei der Auswahl eines Zielzustands (Migrationsziel) eindeutige Lösungen zu erwarten sind.

Sind die Streckenabschnitte definiert und die entsprechenden Verkehre zugeordnet, ist das Ausgangssystem beschrieben. Im gleichen Zug ist auch die Anzahl der möglichen Migrationsziele (Alternativen) eingeschränkt worden. Migrationsziele, die zwar theoretisch möglich sind, aber den Anforderungen der jeweiligen Verkehre oder Abschnitte nicht genügen, müssen nicht weiter betrachtet werden. Es ist darauf zu achten, dass das Migrationsziel eines Abschnitts immer dem Verkehr mit den höchsten Anforderungen genügt. Damit umfasst der Handlungsspielraum nur noch realistische Optionen.

Die Anforderungen an die einzelnen Streckenabschnitte müssen nun für den gesamten Korridor zusammengetragen werden. Abbildung 27 zeigt ein Beispiel für die so entstehende Beschreibung eines beliebigen Korridors.



*Klasse B System entspricht nicht PZB oder LZB.

Abbildung 27: Beschreibung eines internationalen Beispielkorridors, in Anlehnung an [29]

Die Spalten der Darstellung stehen für verschiedene Streckenabschnitte. In der ersten Zeile sind die vorhandenen Verkehre verzeichnet und charakterisiert. Dabei wird in diesem Fall zwischen dem Güterverkehr (SGV), Hochgeschwindigkeitsverkehr (HGV) und dem Personennahverkehr (SPNV) unterschieden. Daraus folgt in der zweiten Zeile eine Beschreibung des aktuellen Zustands. Die dritte Zeile zeigt die Migrationsziele, die den gestellten Basisanforderungen genügen. Da die daraus resultierende Stellwerkstechnologie zwar nicht unmittelbar als Anteil von ETCS betrachtet wird, jedoch sehr eng damit verbunden ist, werden die Stellwerksoptionen in der letzten Zeile ausgewiesen. In diesem Beispiel ist zu beachten, dass sich der Abschnitt III in einem anderen Land befindet als die Abschnitte I und II. Die Verkehre 1 und 2 sind also grenzüberschreitend.

An dieser Stelle ist der methodische Schritt der Entwicklung von Migrationsstrategien abgeschlossen. Die verschiedenen Ebenen der ETCS-Migration wurden dargestellt und in die drei Phasen der betriebswirtschaftlichen Planungsprozesse strukturiert. Diese Struktur bietet die Basis für die Fokussierung der in den Kapiteln 5 und 6 durchgeführten Anwendung / Fallstudie. Für die operative Ebene sind die Basisstrategien erläutert worden. Mit diesem methodischen Werkzeug kann die Identifikation der optimalen Strategie im nächsten Schritt unter Berücksichtigung der spezifischen Randbedingungen und auf Basis der unter 4.3 beschriebenen Ansätze auf die Auswertung der zwei Kennzahlen – Migrationskosten und Migrationsdauer – zurückgeführt werden. Dafür wird zunächst eine Einordnung der Migrationsprojekte in das betriebswirtschaftliche Umfeld vorgenommen. Es folgt die Herleitung der Berechnungsvorschrift für die in diesem Schritt relevanten Kennzahlen. Die Anwendung in Form einer Fallstudie findet im Abschnitt 5.4 statt.

5 Bewertung von Migrationsstrategien

In diesem Schritt der Methodik sind die möglichen Migrationsszenarien zu bewerten und somit die optimale Strategie für das jeweils betrachtete Zielsystem zu identifizieren. Dabei können – wie oben bereits erwähnt und durch Expertenmeinungen belegt – zunächst die beiden Kennzahlen Kosten und Zeit als relevante Entscheidungskriterien identifiziert werden. Zusätzlich sollte aufgrund der häufig niedrigen Vorhersagbarkeit der künftigen Entwicklung relevanter Parameter die Stabilität dieser Kennzahlen bzw. das Risikomaß innerhalb der jeweiligen Migrationsstrategien anhand einer Sensitivitätsanalyse ermittelt werden.

5.1 Dauer der Migrationsszenarien

Der zeitliche Ablauf der Migrationsprozesse und die daraus resultierende Migrationsdauer ist eine der entscheidenden Kennzahlen bei der Bewertung von Migrationsstrategien. Eine Koordination der taktischen mit der operativen Ebene der Migration ist hier von zentraler Bedeutung.

In diesem Zusammenhang kann sowohl der Top-down- wie auch der Bottom-up-Ansatz angewendet werden.

Bei dem Top-down-Ansatz wird die operative Migrationsplanung einzelner Strecken und Streckenabschnitte durch die Vorgaben der übergeordneten Korridorplanung determiniert. Innerhalb der so geschaffenen Randbedingungen werden für einzelne Streckenabschnitte die Migrationsszenarien auf operativer Ebene entwickelt und auf ihre zeitliche Machbarkeit geprüft. Dabei ist in der praktischen Anwendung häufig der Zeitpunkt der Erreichens der Interoperabilität die entscheidende Kenngröße und nicht der formale Ablauf der gesamten Strategie einschließlich des Rückbaus der Altsysteme wie in Abschnitt 4.3 dargestellt.

Ein weiterer Top-down getriebener Ansatz zur Planung des zeitlichen Migrationsablaufs kann auch der Abkündigungszeitpunkt einer aktuell verwendeten Technik sein. So ist die Abschaltung der auf den Hochgeschwindigkeitsstrecken in Deutschland installierten LZB im Jahr 2026 geplant und bedarf somit eines entsprechenden Obsoleszenzkonzeptes.

Im Falle des internationalen Güterverkehrskorridors A von Rotterdam nach Genua durch die Niederlande (NL), Deutschland (D), die Schweiz (CH) und Italien (I) ist diese Planung in der Abbildung 28 dargestellt. Dabei ist hier für die Länder Schweiz und Italien beispielhaft jeweils einer der beiden Streckenzweige aufgezeigt.

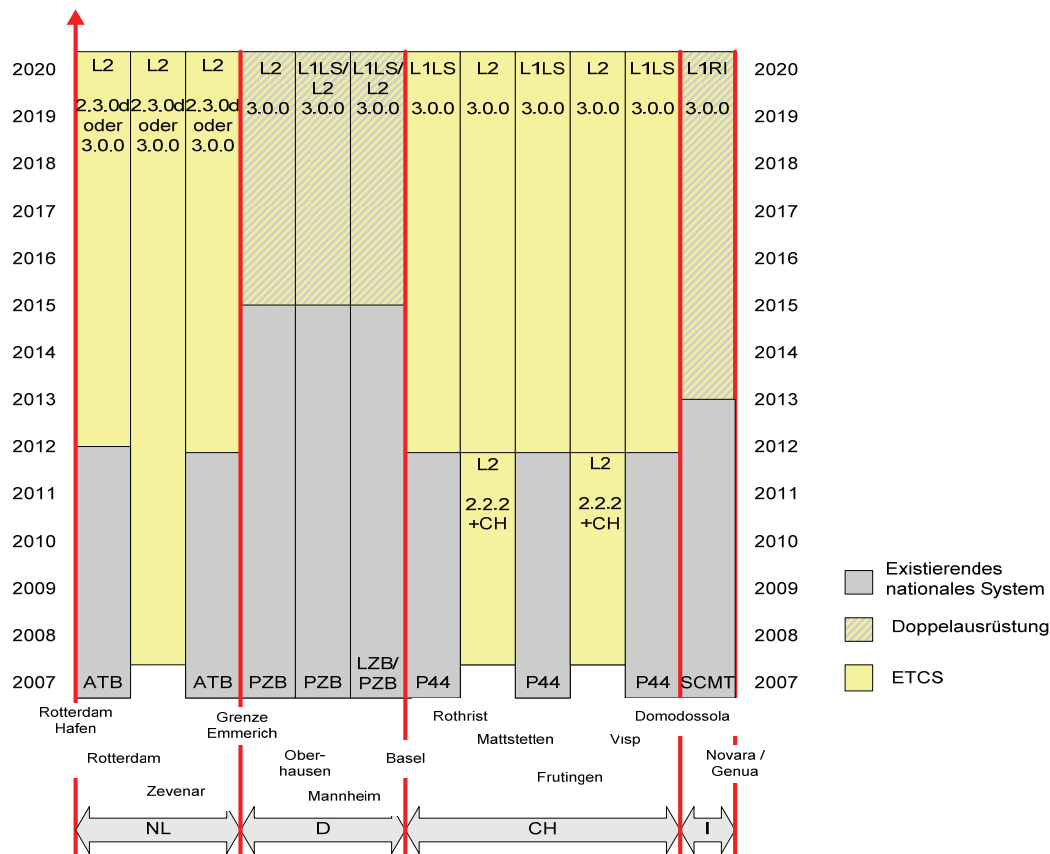


Abbildung 28: Migrationsplanung Korridor Rotterdam – Genua, Stand 06 / 2009 (in Anlehnung an [61])

Die einzelnen Balken stellen den Übergang vom aktuellen nationalen Zugbeeinflussungssystem

- ATB für die Niederlande,
- PZB und LZB für Deutschland,
- „P44“ indiziert die Tatsache, dass in der Schweiz im Paket 44 als Telegramm im Rahmen des ETCS die Informationen der nationalen Systeme ZUB und SIGNUM bereits heute mittels Eurobalisen übertragen werden,
- SCMT für Italien

mit den entsprechenden Terminen dar. Das Zielsystem wird als ETCS-Ausrüstungsstandard (ETCS-Level und die dazugehörige Systemspezifikation) dargestellt. So wird auf dem deutschen Abschnitt zwischen Emmerich und Basel sowie in der Schweiz ein Mix zwischen ETCS Level 2 und Level 1 Limited Supervision (Stand 05/2009) in der SRS-Version 3.0.0 implementiert. Auf dem italienischen Abschnitt kommt Level 1 mit einem Radio Infill zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit zum Einsatz. Hier wird statt des konventionellen Infills (Kapitel 2.4) die Information über die Aufwertung der Fahrerlaubnis auf den entsprechenden Streckenabschnitten über Funk übertragen. Die Kompatibilität der einzelnen SRS-Versionen zueinander ist im Abschnitt 4.1.2 dargestellt.

In einem Bottom-up-Ansatz würden die im Abschnitt 4.3.1 vorgestellten Migrationsstrategien für einzelne Streckenabschnitte als Randbedingung für die Planung des Gesamtkorridors definiert werden. Dieser Ansatz ist für die Planung von internationalen Korridoren aufgrund der unterschiedlichen Voraussetzungen eher ungeeignet. Die Top-down-Planung sollte aber die jeweiligen Abschnitte mit ihren spezifischen zeitlichen Parametern berücksichtigen.

Die Migrationsdauer auf der operativen Ebene ergibt sich dabei aus dem Ablauf des jeweiligen Szenarios und der für die Maßnahmen bereitgestellten Umrüstungskapazitäten. Der jeweilige Ablauf (Abschnitt 4.3) kann als Balkendiagramm oder Gantt-Plan dargestellt werden (Abbildung 29).

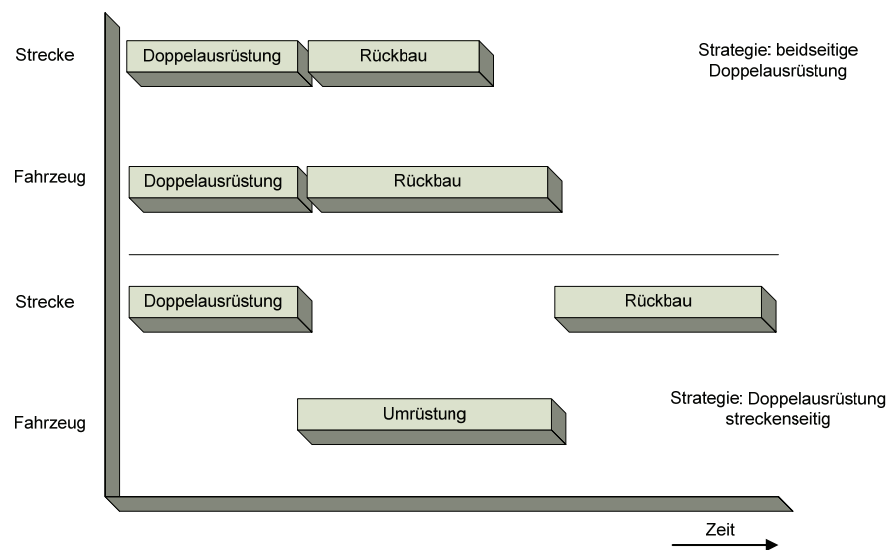


Abbildung 29: Gantt-Darstellung der operativen Ebene der Migration auf Streckenabschnitten und dem zugehörigen Fahrzeugpark

5.2 Migrationsprojekte als Investitionen

Bei der Analyse von Migrationskosten soll hier zunächst die betriebswirtschaftliche Bedeutung eines Migrationsvorhabens betrachtet werden. In diesem Zusammenhang ist die Einführung eines neuen technischen Systems als Investition anzusehen. Eine Investition ist eine Vermögensumschichtung und stellt als solche betriebswirtschaftlich keine Kosten dar. Die bilanziellen Kosten entstehen erst durch die im Laufe des Betriebs des Investitionsmittels realisierten Abschreibungen für die Abnutzung. Diese Wertminderung wird bilanziell als Kostenart – verteilt auf die Abschreibungsdauer – verbucht [10].

Andererseits bedeutet eine Investition auch eine Finanzmittelauszahlung im Rahmen der Anschaffung einer Anlage. Somit kann von zwei Betrachtungsweisen bei der Darstellung von Investitionen gesprochen werden:

- kostenorientierte Betrachtung
- Cashflow-orientierte Betrachtung

Die im Abschnitt 3.1.1 vorgestellte Kapitalwertmethode wird hier in einer abgewandelten Form angewendet. Dabei werden nicht die positiven Erträge einer Investition den auftretenden Auszahlungen gegenüber gestellt, sondern die Kosten eines Referenz- oder Weiterführungsszenarios. Auf diese Art werden die Migrationskosten isoliert dargestellt und somit eine objektive Kennzahl für den Entscheidungsprozess bereit gestellt. Die Tatsache, dass hier auf die Analyse der Erträge – Einnahmen aus den Trassenerlösen für EIU und Einnahmen aus der Transportdienstleistung für EVU – verzichtet wird, begründet sich in der Zielsetzung der Bewertung von Migrationsszenarien. Dabei werden nicht die Zielsysteme sondern die Migrationspfade hin zu den zulässigen Zielsystemen bewertet. Im Rahmen des Erreichens der Interoperabilität und somit der Generierung der durch ETCS zu erwartenden positiven Effekte ist es demnach weniger relevant

- die höchst unsichere Erwartungen hinsichtlich der Trassenpreise für ETCS-Strecken im Vergleich zu Klasse B - Strecken oder
- die höchst unsichere Erwartungen hinsichtlich der von den EVUs zu erzielenden Erlöse

zu quantifizieren und gemäß einer klassischen Kapitalwertmethode in die Berechnung einzubeziehen. Vielmehr ist – aufgrund der Tatsache, dass ein Prozess und nicht das technische System bewertet wird – die Dauer eines Migrationsszenarios und damit der Zeitpunkt der möglichen Realisierung der durch die Interoperabilität erzeugten Vorteile als zusätzliche Kennzahl zu bestimmen (s. auch 5.1).

Für die Berechnung der Migrationskosten werden somit den jeweils vom spezifischen Migrationsszenario abhängen Einführungskosten die Kosten eines Referenzszenarios gegenüber gestellt.

$$C_{f/s} = E_{f/s} - R_{f/s} \quad (2)$$

$C_{f/s}$: Migrationskosten (**f**: fahrzeug- und **s**: streckenseitig)

$E_{f/s}$: Einführungskosten neues System ETCS (fahrzeug- und streckenseitig)

$R_{f/s}$: Kosten Referenz- bzw. Weiterführungsszenario (fahrzeug- und streckenseitig)

Dabei setzen sich die beiden Kostenblöcke E und R aus einer Anzahl an investiven und operativen Kostenpositionen zusammen.

So gilt für die Einführungskosten allgemein:

$$E_{f/s} = \sum (A^{neu} + W + A_{STW} + Z) \quad (3)$$

A^{neu} : Anschaffungskosten (Investitionen) der fahrzeug- und streckenseitigen ETCS-Ausrüstung

W : Instandhaltungskosten des aktuellen Bestands an ETCS und der durch die jeweilige Migrationsstrategie zu einem bestimmten Zeitpunkt noch verbliebenen Bestands des Alt-systems

A_{STW} : Anschaffungskosten der durch die ETCS-Migration notwendigen ESTW

Z: Rückbaukosten der Alttechnik als Abschluss der Migration (falls in der jeweiligen Strategie vorhanden)

Im Rahmen der Kosten des Referenzszenarios gilt:

$$R_{f/s} = \sum (A^{alt} + W^{alt}) \quad (4)$$

A^{alt} : Anschaffungskosten (Investitionen) für den Ersatz des Altsystems bei eingetretener technischer Abgängigkeit

W^{alt} : Instandhaltungskosten für den gesamten Bestand des Altsystems

Im Detail stellen sie die Kostenposition wie folgt dar:

$$E_{f/s} = \sum_{t=0}^m (A_{f,t}^{neu} + A_{s,t}^{neu} + W_{f,t}^{neu} + W_{s,t}^{neu} + W_{f,t}^{alt} + W_{s,t}^{alt} + A_{STW,t} + Z_{f,t}^{alt} + Z_{s,t}^{alt}) \cdot \frac{1}{(1+i)^t} \quad (5)$$

und

$$R_{f/s} = \sum_{t=0}^m (A_{f,t}^{alt} + A_{s,t}^{alt} + W_{fges,t}^{alt} + W_{sges,t}^{alt}) \cdot \frac{1}{(1+i)^t} \quad (6)$$

$A_{f,t}^{neu}$ Anschaffungskosten (Investitionen) neues System fahrzeugseitig

Hierbei handelt es sich um die Kosten der investiven Maßnahmen zur Anschaffung und Installation der fahrzeugseitigen ETCS-Ausrüstung (s. auch 2.4). Die Kosten werden in Jahresscheiben dargestellt und dabei aus der Anzahl der im jeweiligen Jahr t auszurüstenden Fahrzeuge n und dem Kostensatz pro Fahrzeugsystem F errechnet.

$$A_{f,t}^{neu} = F^{neu} \cdot n_{f,t}^{neu} \quad (7)$$

Die Ausgaben werden vom EVU getätigt und beinhalten sowohl die Nachrüstung der bestehenden Fahrzeuge als auch die ETCS-Fahrzeugkomponenten für Neufahrzeuge.

$A_{s,t}^{neu}$ Anschaffungskosten (Investitionen) neues System streckenseitig

Hierbei handelt es sich um investive Maßnahmen für die Beschaffung und Installation der streckenseitigen ETCS-Komponenten (s. auch 2.4). Die Kosten werden in Jahresscheiben dargestellt und dabei aus der Streckenlänge l , die im jeweiligen Jahr ausgerüstet wird und dem Kostensatz S für einen Kilometer der Streckenausrüstung errechnet.

$$A_{s,t}^{neu} = S^{neu} \cdot l_{s,t}^{neu} \quad (8)$$

Die Ausgaben werden vom EIU getätigt und beinhalten sowohl die bestehenden als auch Neubaustrecken.

$W_{f,t}^{neu}$ Wartungs- und Instandhaltungskosten (operative Ausgaben) neues System fahrzeugseitig

Hierbei handelt es sich um die operativen Aufwände für die präventive sowie die korrektive Instandhaltung der fahrzeugseitigen ETCS-Komponenten. Diese Kostenposition wird mit Hilfe

des Instandhaltungs-Kostensatzes pro Fahrzeugsystem IH in Jahresscheiben ermittelt und bezieht sich auf die im jeweiligen Jahr aktuelle Menge an der mit ETCS ausgerüsteten Einheiten.

$$W_{f,t}^{neu} = IH_f^{neu} \cdot an_{f,t}^{neu} \quad (9)$$

Nachdem die gesamte relevante Fahrzeugflotte n mit ETCS ausgerüstet ist, gilt

$$W_{fges,t}^{neu} = IH_f^{neu} \cdot n_f^{neu} \quad (10)$$

Diese Ausgaben werden vom EVU getätigt.

$W_{s,t}^{neu}$ Wartungs- und Instandhaltungskosten (operative Ausgaben) neues System streckenseitig

Hierbei handelt es sich um die operativen Aufwände für die präventive sowie die korrektive Instandhaltung der streckenseitigen ETCS-Komponenten. Diese Kostenposition wird mit Hilfe des Instandhaltungs-Kostensatzes pro Streckenkilometer der ETCS-Ausrüstung IH in Jahresscheiben ermittelt und bezieht sich auf die im jeweiligen Jahr aktuelle ETCS-Streckenlänge al.

$$W_{s,t}^{neu} = IH_s^{neu} \cdot al_{s,t}^{neu} \quad (11)$$

Nachdem alle relevanten Streckenabschnitte mit ihrer Länge l ausgerüstet sind, gilt

$$W_{sges,t}^{neu} = IH_s^{neu} \cdot l_s^{neu} \quad (12)$$

Diese Ausgaben werden vom EIU getätigt.

$W_{f,t}^{alt}$ Wartungs- und Instandhaltungskosten (operative Ausgaben) altes nationales System fahrzeugseitig

Hierbei handelt es sich um die operativen Aufwände für die präventive sowie die korrektive Instandhaltung der sich auf den Fahrzeugen der relevanten Fahrzeugflotte noch befindlichen fahrzeugseitigen Komponenten des nationalen Zugsicherungssystems. Diese Position ist in den Einführungskosten enthalten, weil der Grad an Doppelausrüstung bzw. die Geschwindigkeit der Umrüstung als Differenzierungsmerkmal einzelner Migrationsszenarien formuliert wird. Die Kosten setzen sich aus dem Instandhaltungskostensatz des Altsystems IH und der im jeweiligen Jahr aktuelle Menge an der noch mit dem nationalen System ausgerüsteten Einheiten an. Dabei sind nur die Fahrzeugeinheiten zu berücksichtigen, die von der Migration betroffen sind.

$$W_{f,t}^{alt} = IH_f^{alt} \cdot an_{f,t}^{alt} \quad (13)$$

Diese Ausgaben werden vom EVU getätigt.

$W_{s,t}^{alt}$ Wartungs- und Instandhaltungskosten (operative Ausgaben) altes nationales System streckenseitig

Hierbei handelt es sich um die operativen Aufwände für die präventive sowie die korrektive Instandhaltung der sich auf den Fahrzeugen der relevanten Fahrzeugflotte noch befindlichen fahrzeugseitigen Komponenten des nationalen Zugsicherungssystems. Diese Position ist in

den Einführungskosten enthalten, weil der Grad an Doppelausrüstung bzw. die Geschwindigkeit der Umrüstung als Differenzierungsmerkmal einzelner Migrationsszenarien formuliert wird. Die Kosten setzen sich aus dem Instandhaltungskostensatz des Altsystems IH und der im jeweiligen Jahr aktuelle Menge an der noch mit dem nationalen System ausgerüsteten Einheiten an. Dabei sind nur die Fahrzeugeinheiten zu berücksichtigen, die von der Migration betroffen sind.

$$W_{f,t}^{alt} = IH_f^{alt} \cdot an_{f,t}^{alt} \quad (14)$$

Diese Ausgaben werden vom EVU getätigt.

$A_{STW,t}$ Anpassungskosten (Investition) der Stellwerkstechnik

Betrieb von ETCS Level 2 erfordert in der Regel einen Einsatz der elektronischen STW-Technik. Das RBC ist dabei an die Unterzentrale (UZ) eines STW anzukoppeln. Nur mit Verwendung von Fernsteuersystemen ist eine Verknüpfung mit einem RSTW möglich. Deswegen ist bei der Ausrüstung mit L2 eine Investition in die ESTW-Technik auf der Ausgabenseite zu berücksichtigen. Die Kosten setzen sich aus dem Kostensatz für eine Stelleinheit (STE) A und der Anzahl n der im jeweiligen Jahr zu erneuernden STE zusammen.

$$A_{stw,t} = A_{STE} \cdot n_{STE,t} \quad (15)$$

Die STE ist dabei eine Hilfsgröße zur Dimensionierung eines ESTW und seiner Kostenschätzung. Dazu zählen Signale, Weichenantriebe und Gleissperren [11]. Die Ausgaben werden vom EIU getätigt.

$Z_{f,t}^{alt}$ Rückbaukosten (operative Ausgaben) altes System fahrzeugseitig

Diese Kostenposition ist im Rahmen der Einführungskosten E dargestellt, weil hierbei eine Unterscheidung in Abhängigkeit des jeweiligen Migrationsszenarios stattfinden kann. Somit ist diese Kennzahl als ein mögliches Differenzierungsmerkmal einzelner Migrationsszenarien zu betrachten. Einige Szenarien beinhalten den Rückbau der Alttechnik, bei anderen ist das Migrationsziel bereits der Parallelbetrieb der Alttechnik mit ETCS. Dabei setzen sich die Kosten aus dem Kostensatz für die Demontage eines Fahrzeugsystems D und der im Betrachtungsjahr durch das jeweilige Szenario resultierenden Anzahl der abzurüstenden Fahrzeuge an.

$$Z_{f,t}^{alt} = D_f^{alt} \cdot an_{f,t}^{alt} \quad (16)$$

Die Ausgaben werden vom EVU zur Vermeidung der technisch und betrieblich nicht mehr notwendigen Mehrfachausrüstung getätigt. Voraussetzung für die wirtschaftliche Sinnfälligkeit ist eine ausreichend lange Restlebensdauer der Fahrzeuge. Die Einsatzflexibilität wird durch den Rückbau gemindert.

$Z_{s,t}^{alt}$ Rückbaukosten (operative Ausgaben) altes System streckenseitig

Diese Kostenposition ist im Rahmen der Einführungskosten E dargestellt, weil hier eine Unterscheidung in Abhängigkeit vom jeweiligen Migrationsszenario stattfindet und somit diese Kennzahl als Differenzierungsmerkmal einzelner Migrationsszenarien formuliert wird. Einige Szenarien beinhalten den Rückbau der Alttechnik, bei anderen ist das Migrationsziel bereits der Parallelbetrieb der Alttechnik mit ETCS. Dabei setzen sich die Kosten aus dem Kostensatz

für die Demontage eines Streckenkilometers des Altsystems D und der im Betrachtungsjahr durch das jeweilige Szenario resultierenden abzurüstenden Streckenlänge al.

$$Z_{s,t}^{alt} = D_s^{alt} \cdot al_{s,t}^{alt} \quad (17)$$

Die Ausgaben werden vom EIU zur Vermeidung der technisch und betrieblich nicht mehr notwendigen Mehrfachausrüstung getätigt. Voraussetzung für die wirtschaftliche Sinnfälligkeit ist der Ablauf der technischen Lebensdauer, da sonst Rückzahlungen der Bundes-Haushaltsmittel (BHH) anfallen können.

$A_{f,t}^{alt}$ Anschaffungskosten (Ersatzinvestition) altes System fahrzeugseitig

Diese Kostenposition ist im Rahmen des Referenz- oder Weiterführungsszenarios zu berücksichtigen. Sie bezieht sich auf die eventuell innerhalb des Zeitraums m des Migrationsprozesses im Falle der Systemweiterführung anfallenden Ersatzinvestitionen in das alte nationale Zugbeeinflussungssystem. Die Höhe der Ersatzinvestition setzt sich aus dem Kostensatz für ein Fahrzeugsystem F und die Anzahl der auszurüstenden Einheiten n.

$$A_{f,t}^{alt} = F^{alt} \cdot n_{f,t}^{alt} \quad (18)$$

Diese Ausgaben fallen auf der EVU-Seite an.

$A_{s,t}^{alt}$ Anschaffungskosten (Ersatzinvestition) altes System streckenseitig

Diese Kostenposition ist im Rahmen des Referenz- oder Weiterführungsszenarios zu berücksichtigen. Sie bezieht sich auf die eventuell innerhalb des Zeitraums m des Migrationsprozesses im Falle der Systemweiterführung anfallenden Ersatzinvestitionen in das alte nationale Zugbeeinflussungssystem. Die Höhe der Ersatzinvestition setzt sich aus dem Kostensatz für einen Streckenkilometer der Ausrüstung S und der Länge der auszurüstenden Strecke l.

$$A_{s,t}^{alt} = S^{alt} \cdot l_{s,t}^{alt} \quad (19)$$

Diese Ausgaben werden vom EIU getätigt.

$W_{fges,t}^{alt}$ Wartungs- und Instandhaltungskosten (operative Ausgaben) altes nationales System fahrzeugseitig / als Teil des Referenzszenarios

Im Gegensatz zu der vergleichbaren Kostenposition innerhalb der Einführungskosten wird hier die Anzahl der Fahrzeuge nicht dynamisch in Abhängigkeit der szenarienbedingten Veränderung angepasst. Im Referenzszenario gibt diese Position die Instandhaltungskosten wieder, die für die gesamte betrachtete Fahrzeugflotte n ohne die ETCS-Migration anfallen würden.

$$W_{fges,t}^{alt} = IH_f^{alt} \cdot n_f^{alt} \quad (20)$$

Diese Ausgaben werden vom EVU getätigt.

$W_{sges,t}^{alt}$ Wartungs- und Instandhaltungskosten (operative Ausgaben) altes nationales System streckenseitig / als Teil des Referenzszenarios

Im Gegensatz zu der vergleichbaren Kostenposition innerhalb der Einführungskosten wird hier die Streckenlänge nicht dynamisch in Abhängigkeit der szenarienbedingten Veränderung angepasst. Im Referenzszenario gibt diese Position die Instandhaltungskosten wieder, die für die gesamte Streckenlänge l ohne die ETCS-Migration anfallen würden.

$$W_{sges,t}^{alt} = IH_s^{alt} \cdot l_s^{alt} \quad (21)$$

Diese Ausgaben werden vom EIU getätigt.

i Kalkulationszinssatz

Die Verzinsung wird aus der Sicht des Systemverbundes betrachtet und somit für beide Systemanteile (EIU, EVU) gleichgesetzt.

m Migrationsdauer des jeweiligen Szenarios

Diese Kennzahl drückt die Dauer des jeweiligen Migrationsszenarios in Jahren aus. Diese Kenngröße wird durch die Länge der auszurüstenden Strecken, die Anzahl der von der Migration betroffenen Fahrzeuge, der Aus- bzw. Umrüstkapazitäten sowie vom Ablauf des jeweiligen Migrationsszenarios determiniert.

Für die einzelnen Szenarien kann die Berechnungsvorschrift spezifiziert werden. So setzen sich die Migrationskosten des Szenarios „Streckenseitige Doppelausrüstung“ (s. auch 4.3) aus den Kosten der einzelnen Phasen

- (1) Ausrüstung der Strecke mit ETCS (parallel zum nationalen Zugsicherungssystem)
- (2) Umrüstung der Fahrzeuge
 - Ausrüstung der Fahrzeuge mit ETCS
 - Rückbau der fahrzeugseitigen Altsysteme
- (3) Rückbau der streckenseitigen Altsysteme

zusammen.

Wenn t_1 bis t_3 die Zeitpunkte der Beendigung der Phasen 1 bis 3 sind, dann gilt:

Phase 1:

$$C_{f/s}^{P1} = \sum_{t=0}^{t_1} [(A_{s,t}^{neu} + W_{s,t}^{neu} + W_{f,t}^{alt} + W_{s,t}^{alt} + A_{STW,t}) - (A_{s,t}^{alt} + A_{f,t}^{alt} + W_{fges,t}^{alt} + W_{sges,t}^{alt})] \cdot \frac{1}{(1+i)^t} \quad (22)$$

Dabei bezeichnet der Term in der ersten Klammer die Anschaffungskosten für die streckenseitige ETCS-Ausrüstung und die notwendigen elektronischen Stellwerke sowie die Instandhaltungskosten strecken- und fahrzeugseitig in Bezug auf den aktuellen Bestand an ETCS sowie an den Altsystemen. Der zweite Term beschreibt die Kosten des Weiterführungsszenarios im investiven sowie im operativen Bereich. Die Anschaffungskosten für die Altsysteme sind hier ebenfalls verzeichnet, weil im Anwendungsfall einer „natürlichen“ Migration – Einführung eines neuen Systems bei technischer Abgängigkeit der Alttechnik – die Ersatzinvestition der Alttechnik und die dazugehörigen Anschaffungskosten berücksichtigt werden müssen. Beispiel für eine derartige Migration wird die Ablösung der Linienzugbeeinflussung (LZB) in Deutschland voraussichtlich ab 2020 sein.

Da in dieser Phase noch kein Rückbau der Altsysteme (fahrzeug- und streckenseitig) stattgefunden hat, gilt

$$W_{f,t}^{alt} = W_{fges,t}^{alt} \text{ und } W_{s,t}^{alt} = W_{sges,t}^{alt} \quad (23)$$

Daraus folgt

$$C_{f/s}^{P1} = \sum_{t=0}^{t_1} (A_{s,t}^{neu} + W_{s,t}^{neu} + A_{STW,t} - A_{s,t}^{alt} - A_{f,t}^{alt}) \cdot \frac{1}{(1+i)^t} \quad (24)$$

Die tatsächlichen Kosten werden zusätzlich durch die jeweiligen Mengen determiniert (s. oben)

Phase 2:

$$C_{f/s}^{P2} = \sum_{t=t_1+1}^{t_2} [(A_{f,t}^{neu} + W_{f,t}^{neu} + W_{s,t}^{neu} + W_{f,t}^{alt} + W_{s,t}^{alt} + Z_{f,t}^{alt}) - (A_{s,t}^{alt} + A_{f,t}^{alt} + W_{fges,t}^{alt} + W_{sges,t}^{alt})] \cdot \frac{1}{(1+i)^t} \quad (25)$$

Dabei bezeichnet der Term in der ersten Klammer die Anschaffungskosten für die Fahrzeug-ausrüstung ETCS, die Instandhaltungskosten der jeweiligen aktuellen Bestände an ETCS und an Altsystemen sowie die Rückbaukosten der fahrzeugseitigen Altsysteme. Der Term in der zweiten Klammer beschreibt – analog zur ersten Phase – die Kosten des Weiterführungsszenarios. Diese ändern sich phasenbezogen nicht, da sie als konstante Referenz definiert sind.

In dieser Phase ist die Strecke bereits komplett doppelt ausgerüstet – die Fahrzeuge werden sukzessive umgerüstet (inklusive des Rückbaus der Altsysteme), bzw. Neufahrzeuge nur mit ETCS bestellt, so dass gilt

$$W_{f,t}^{alt} \neq W_{fges,t}^{alt}, \quad W_{s,t}^{alt} = W_{sges,t}^{alt} \text{ und } W_{s,t}^{neu} = W_{sges,t}^{neu} \quad (26)$$

Daraus folgt

$$C_{f/s}^{P2} = \sum_{t=t_1+1}^{t_2} (A_{f,t}^{neu} + W_{f,t}^{neu} + W_{sges,t}^{neu} + W_{f,t}^{alt} + Z_{f,t}^{alt} - A_{s,t}^{alt} - A_{f,t}^{alt} - W_{fges,t}^{alt}) \cdot \frac{1}{(1+i)^t} \quad (27)$$

Phase 3:

$$C_{f/s}^{P3} = \sum_{t=t_2+1}^{t_3} [(W_{fges,t}^{neu} + W_{sges,t}^{neu} + W_{s,t}^{alt} + Z_{s,t}^{alt}) - (A_{s,t}^{alt} + A_{f,t}^{alt} + W_{fges,t}^{alt} + W_{sges,t}^{alt})] \cdot \frac{1}{(1+i)^t} \quad (28)$$

In dieser Phase ist die relevante Fahrzeugflotte bereits auf ETCS umgerüstet, so dass auf der Streckenseite der Rückbau des Altsystems erfolgen kann.

Der erste Term beschreibt die Instandhaltungskosten der in dieser Phase vollständig mit ETCS ausgerüsteten Streckenlänge sowie der betrachteten Fahrzeugflotte. Des Weiteren sind die Instandhaltungskosten der aktuell noch streckenseitig vorhandenen Altsysteme sowie die Kosten ihres sukzessiven Rückbaus berücksichtigt. Der zweite Term stellt weiterhin den Bezug zum Weiterführungsszenario dar. Daraus folgt

$$C_{f/s}^{P3} = \sum_{t=t_2+1}^{t_3} (W_{fges,t}^{neu} + W_{sges,t}^{neu} + W_{s,t}^{alt} + Z_{f,t}^{alt} - A_{s,t}^{alt} - A_{f,t}^{alt} - W_{fges,t}^{alt} - W_{sges,t}^{alt}) \cdot \frac{1}{(1+i)^t} \quad (29)$$

Die Migrationskosten des gesamten Szenarios „Streckenseitige Doppelausrüstung“ setzen sich aus den Kosten der drei Phasen zusammen:

$$\begin{aligned} C_{f/s}^{ges} = & \sum_{t=0}^{t_1} (A_{s,t}^{neu} + W_{s,t}^{neu} + A_{STW,t} - A_{s,t}^{alt} - A_{f,t}^{alt}) \cdot \frac{1}{(1+i)^t} + \\ & \sum_{t=t_1+1}^{t_2} (A_{f,t}^{neu} + W_{f,t}^{neu} + W_{sges,t}^{neu} + W_{f,t}^{alt} + Z_{f,t}^{alt} - A_{s,t}^{alt} - A_{f,t}^{alt} - W_{fges,t}^{alt}) \cdot \frac{1}{(1+i)^t} + \\ & \sum_{t=t_2+1}^{t_3} (W_{fges,t}^{neu} + W_{sges,t}^{neu} + W_{s,t}^{alt} + Z_{f,t}^{alt} - A_{s,t}^{alt} - A_{f,t}^{alt} - W_{fges,t}^{alt} - W_{sges,t}^{alt}) \cdot \frac{1}{(1+i)^t} \end{aligned} \quad (30)$$

Auf diese Art kann die zweite relevante Kennzahl für die Bewertung der Migrationsstrategien – die Migrationskosten – für die jeweiligen Strategien ermittelt werden.

5.3 Berechnung der Kennzahlen Kosten und Dauer im Migrationstool

Um die oben beschriebenen Berechnungen teilweise zu automatisieren und somit die Effizienz im komplexen Prozess der Bewertung von Migrationsszenarien zu erhöhen, wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein Software-Werkzeug entwickelt. Die in 5.2 hergeleiteten und beschriebenen Berechnungsvorschriften für einzelne Migrationsszenarien sind darin umgesetzt worden. Die oben genannten Kostenpositionen werden in der aktuellen Version über die Migrationsdauer als konstant angenommen. Dies ist für die Annäherung in dieser Phase der ETCS-Migration ausreichend bzw. nicht anders sinnvoll möglich, da die Datenbasis ohnehin keine exakten Aussagen zulässt.

Das jeweils gewählte Migrationsszenario impliziert bei dieser Berechnung:

- das Vorhandensein bzw. die Dauer der strecken- oder der fahrzeugseitigen Doppelausrüstung,
- die Zeitpunkte der Investitionen in die strecken- und fahrzeugseitige Ausrüstung,
- die Zeitpunkte der evtl. notwendigen Stellwerksmaßnahmen,
- den Zeitpunkt der evtl. notwendigen Rückbaumaßnahmen für die strecken- und fahrzeugseitigen Altsysteme.

Die Berechnung der Migrationskosten erfolgt hier unter der Annahme, dass die Migrationsdauer nicht die Restlebensdauer der Altsysteme übersteigt. Somit werden im Weiterführungsszenario keine Ersatzinvestitionen in das Altsystem berücksichtigt. Für die Ermittlung der Kennzahlen sind folgende Eingaben (s. auch Kapitel 5.2) notwendig (Tabelle 6):

Allgemeine Angaben zum Streckenabschnitt	Streckenlänge [km] Anzahl der Fahrzeuge kalkulatorischer Zinssatz
Ausrüstungs- und Rückbaukostenätze je Fahrzeug bzw. je Streckenkilometer [€]	Fahrzeugsystem / Anschaffung und Installation Fahrzeugsystem / Rückbau Altsystem Streckensystem / Anschaffung und Installation Streckensystem / Rückbau Altsystem
Wartungskosten im Jahr [€]	neues Fahrzeugsystem altes Fahrzeugsystem neues Streckensystem altes Streckensystem
Aufrüstungs- und Rückbaukapazitäten pro Jahr	Fahrzeugsystem / Aufrüstung neu Fahrzeugsystem / Rückbau Altsystem Streckensystem / Aufrüstung neu [km] Streckensystem / Rückbau alt [km]

Tabelle 6: Eingabedaten Migrationstool

Auf Basis dieser Angaben können anschließend aus dem Verzeichnis der im Abschnitt 4.3.1 vorgestellten Basisstrategien diejenigen ausgewählt werden, die im jeweiligen Anwendungsfall berechnet werden sollen.

Die Abbildung 30 zeigt die entsprechende Eingabemaske.

DLR Migrationstool 0.9.7

Migration

- # A_W_Abschnitt1_Level2
- # A_W_Abschnitt2
- # A_W_Abschnitt3
- # A_W_Abschnitt4
- # A_W_Abschnitt5
- # A_W_Abschnitt6
- # A_W_Abschnitt7
- # A_W_Abschnitt1_Level1
- # Abschnitt4_Level1
- # Abschnitt4_Level2

Anzahl Fahrzeuge: kalkulatorischer Zinssatz:

Strecken-km:

Wartungskosten pro Jahr

altes Fahrzeugsystem:

neues Fahrzeugsystem:

altes Streckensystem:

neues Streckensystem:

Auf- und Abrüstkosten

Fahrzeugsystem: Abrüstung:

Fahrzeugsystem: Anschaffung und Installation:

Streckensystem: Abrüstung:

Streckensystem: Anschaffung und Installation:

Auf- und Abrüstgrenzen pro Jahr

Fahrzeugsystem: Abrüstung:

Fahrzeugsystem: Aufrüstung:

Streckensystem: Abrüstung:

Streckensystem: Aufrüstung:

Abbildung 30: Eingabemaske im Migrationstool

Falls die Migrationsstrategien in ihrer ursprünglichen Definition als Basisstrategien betrachtet werden, sind keine weiteren Eingaben notwendig. Das Software-Werkzeug generiert die Migrationsstrategien für die so beschriebene Strecken-Fahrzeuge-Konstellation automatisch und berechnet die Migrationsdauer, die Mengengerüste der im jeweiligen Jahr vorhandenen Ausrüstungen sowie eine Reihe von Finanzkennzahlen, die manuell ausgewählt werden können.

Dies sind neben den Migrationskosten selbst auch die einzelnen im Abschnitt 5.2 erläuterten Anteile dieser Kennzahl, wie z. B.:

- Kosten Einführungsszenario
- Kosten Weiterführungsszenario
- investive Ausgaben Streckenseite (EIU)
- investive Ausgaben Fahrzeugseite (EVU)
- etc.

Eine tabellarische sowie die dazugehörigen grafischen Darstellungen werden automatisch für jedes Migrationsszenario generiert. Abbildung 31 zeigt beispielhaft eine grafische Darstellung von ausgewählten Finanzkennzahlen eines Migrationsszenarios.

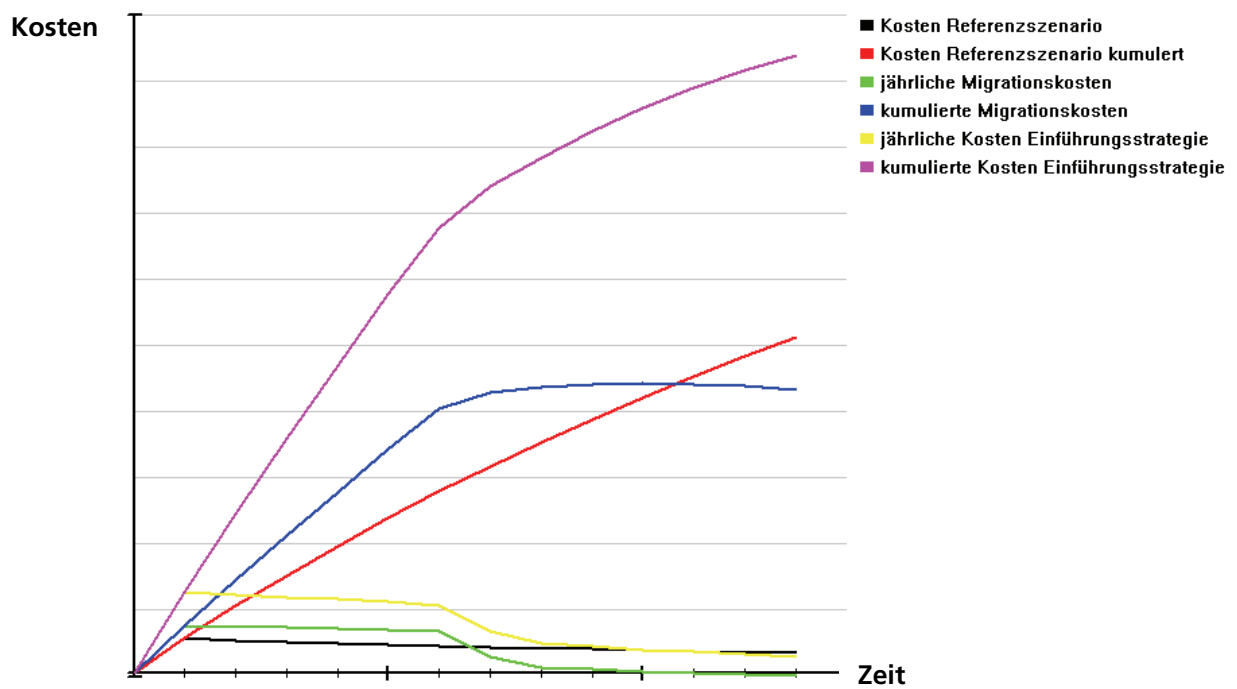


Abbildung 31: Grafische Kostendarstellung – Zeit in Jahren, Kosten in €

Falls andere Darstellungsformen gefordert sind, kann ebenfalls per Microsoft Excel® - Export eine andere Diagrammart generiert werden (Abbildung 32). Hier sind beispielsweise Migrationskosten auf Jahresbasis abgebildet. Das Bild zeigt einen Effekt, der im Abschnitt 5.4 näher vorgestellt wird.

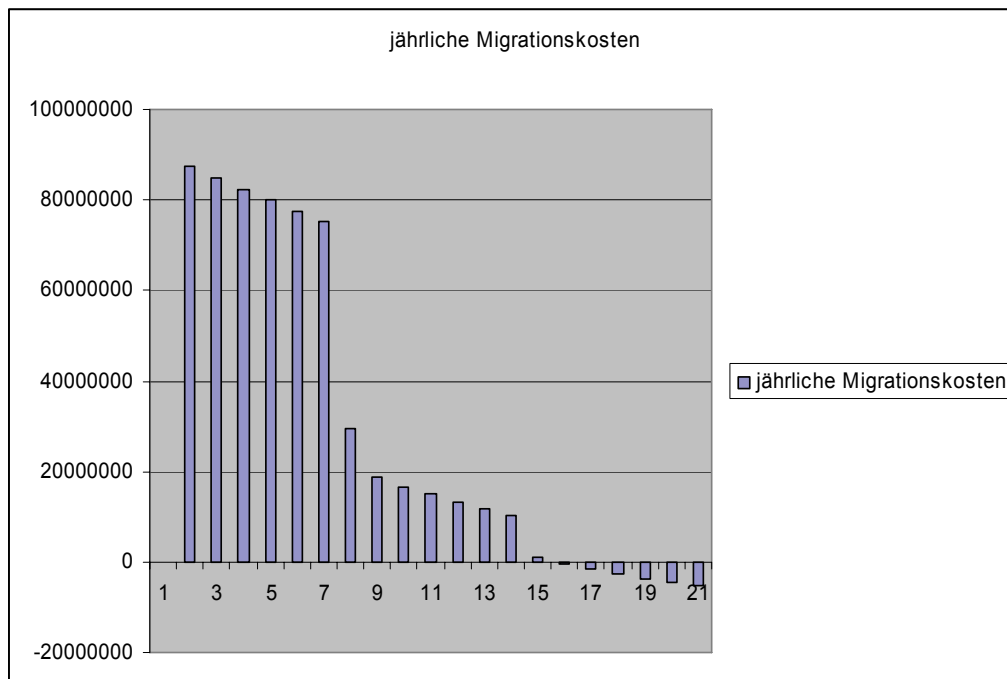


Abbildung 32: Alternative Kostendarstellung durch Excel-Export

Weitere Abbildungen von Oberflächen und Auswertungen finden sich im Anhang.

Falls Abweichungen von den Basisstrategien untersucht werden sollen, kann eine manuelle Korrektur vorgenommen werden. So kann z. B. der Rückbau des Altsystems ausgeschaltet, oder die Anschaffung zusätzlicher Fahrzeuge während der Migration berücksichtigt werden. Diese „*manuellen Strategien*“ werden anschließend nach den gleichen Berechnungsvorschriften toolseitig behandelt, um somit die geforderten Kennzahlen zu errechnen.

Dieses Software-Werkzeug wird aktuell weiter entwickelt mit der Zielsetzung, eine korridor-bezogene Sicht in der Berechnung zu berücksichtigen. Eine Weiterentwicklung des Werkzeugs sollte außerdem:

- eine Dynamik in den Anschaffungskosten erlauben, so dass Preisentwicklungen im Produktlebenszyklus des Systems ETCS berücksichtigt werden können sowie
- eine Dynamik im Bereich der Instandhaltungskosten erlauben, so dass die für die Nutzungsdauer typische „Badewannenkurve“ berücksichtigt werden kann.

Um schließlich die beiden Kennziffern – Migrationskosten und Migrationsdauer – in einer gemeinsamen Darstellung zu integrieren, kann die Portfolio-Technik angewendet werden. Diese Darstellung wird häufig zur Entscheidungsunterstützung bei zwei vorhandenen Führungsgrößen genutzt (s. auch Kapitel 3.1.3).

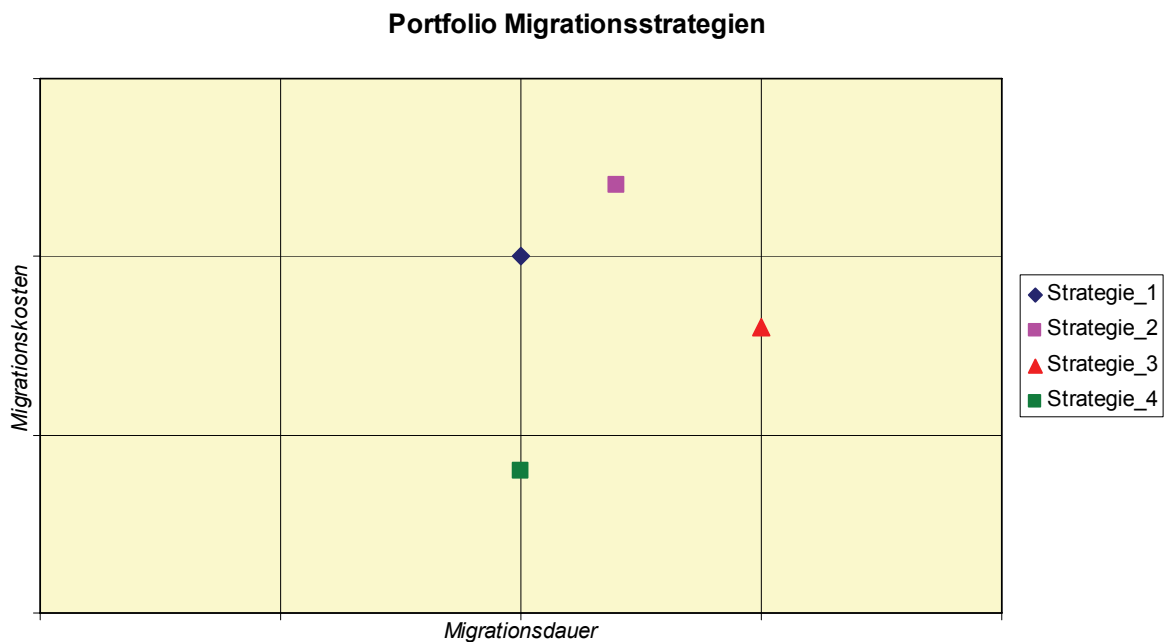


Abbildung 33: Portfoliodarstellung der Kennzahlen Kosten und Zeit der verschiedenen Migrationsstrategien

Die oben beschriebene Berechnung ist für alle Migrationsstrategien der betrachteten Zielsysteme durchzuführen und die Ergebnisse zu visualisieren. Entsprechend den Präferenzen des Entscheiders wird dann für alle möglichen Zielsysteme die optimale Migrationsstrategie anhand der beiden Kennzahlen (Migrationskosten und Migrationsdauer) identifiziert.

Das hier am Beispiel ETCS dargestellte Vorgehen sowie die relevanten Kennzahlen können in anderweitigen Bereichen ebenfalls angewendet werden. Das methodische Vorgehen bleibt gleich, die Strategien können fallweise abweichen. Da das Migrationstool ebenfalls die Generierung von manuellen Migrationsstrategien ermöglicht, ist ihre Anwendbarkeit in konkreten Fällen für weitere technische Systeme zu prüfen.

5.4 Beispiel einer Korridorberechnung

Diese Berechnung bezieht sich auf einen virtuellen Korridor mit sieben homogenen Streckenabschnitten. Dabei stellt sich die folgende Ausgangskonstellation dar:

Es werden zwei Strategien betrachtet:

- Streckenseitige Doppelausrüstung
- Beidseitige (gleichzeitige) Doppelausrüstung

Dies geschieht unter der Maßgabe, dass das nationale System – hier PZB – von der Strecke nicht zurück gebaut wird.

Eine weitere Randbedingung ist die Annahme, dass im Laufe des Migrationsprozesses im Rahmen des Referenzszenarios keine Ersatzinvestition in die PZB stattfinden würde.

Die dritte Annahme betrifft die Stellwerkstechnik: es gilt die Randbedingung, dass auf Streckenabschnitten, die mit über 160 km/h befahren werden sollen und daher mit ETCS Level 2 ausgerüstet werden, bereits elektronische Stellwerke vorhanden sind. Für ETCS Level 1 und LS sind elektronische Stellwerke ohnehin technisch nicht notwendig. Somit findet in diesem Anwendungsbeispiel nur dann eine Investition in die ESTW-Technik statt, falls ein Streckenabschnitt bis 160 km/h mit ETCS Level 2 ausgerüstet wird. Dies kann fallweise aufgrund von spezifischen Anforderungen des Güterverkehrs – wie z. B. lange Bremswege und die damit einhergehende Notwendigkeit der „elektronischen Sicht“ zur Erhöhung der zulässigen Geschwindigkeit (wobei immer noch gilt: $v < 160$ km/h) – erforderlich sein.

Abbildung 34 zeigt die Konfiguration des Beispielkorridors auf Basis der Darstellungsform aus 4.4.

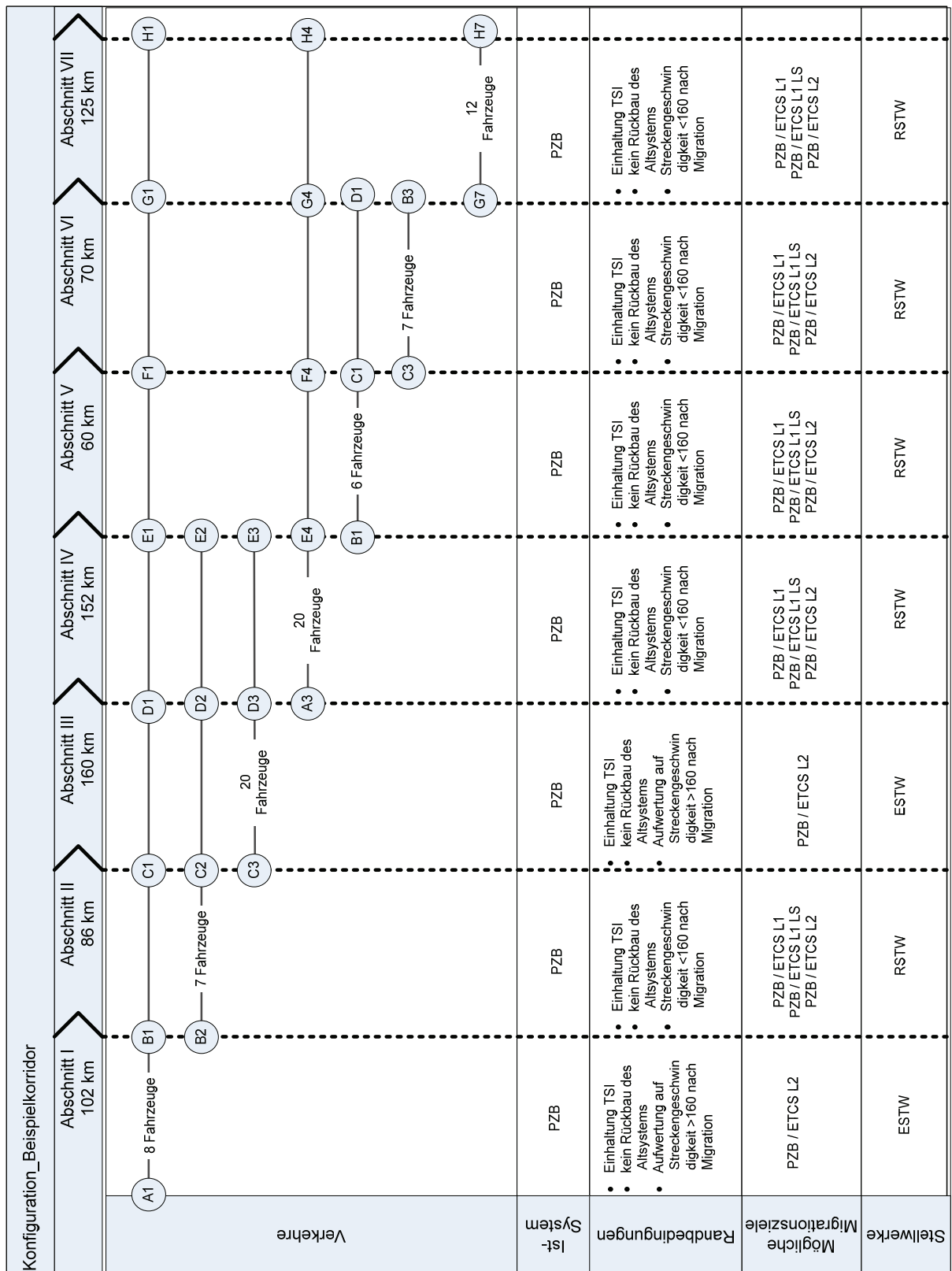


Abbildung 34: Konfiguration Beispielkorridor

Es werden also zunächst für die möglichen Zielsysteme die Kennzahlen Migrationskosten und Migrationsdauer für die verschiedenen Migrationsstrategien berechnet. Dabei werden die im Anhang dokumentierten Annahmen hinsichtlich der Kostensätze sowie der Umrüstungskapazitäten getroffen.

Da streckenseitig die realistische Annahme getroffen wurde, dass die PZB als nationales System beibehalten werden soll, liefert die Basisstrategie *Doppelausrüstung fahrzeugseitig* keine technisch-betriebliche Relevanz und wird daher nicht betrachtet.

In diesem Beispiel können zwei unterschiedliche Arten von Streckenabschnitten identifiziert werden. Für die Abschnitte 1 und 3 sind die Zielsysteme aufgrund der beschriebenen Randbedingungen bereits vorgegeben, so dass hier lediglich die optimale Migrationsstrategie gefunden werden muss. Für die Abschnitte 2, 4, 5, 6 und 7 gilt es für verschiedene Zielsysteme die geeignete Strategie zu finden.

Im Folgenden werden die Abschnitte 1 und 4 analysiert und die Kennzahlen der dazugehörigen Migrationsstrategien mit Hilfe des zuvor vorgestellten Software-Werkzeugs berechnet.

Abschnitt 1

Für den Abschnitt 1 gilt die in der Abbildung 35 dargestellte Verteilung der jährlich auftretenden Migrationskosten der beiden betrachteten Strategien. Diese Kennzahl ist optional zu betrachten und insbesondere hinsichtlich der jeweils jährlich verfügbaren Budgets ggf. relevant.

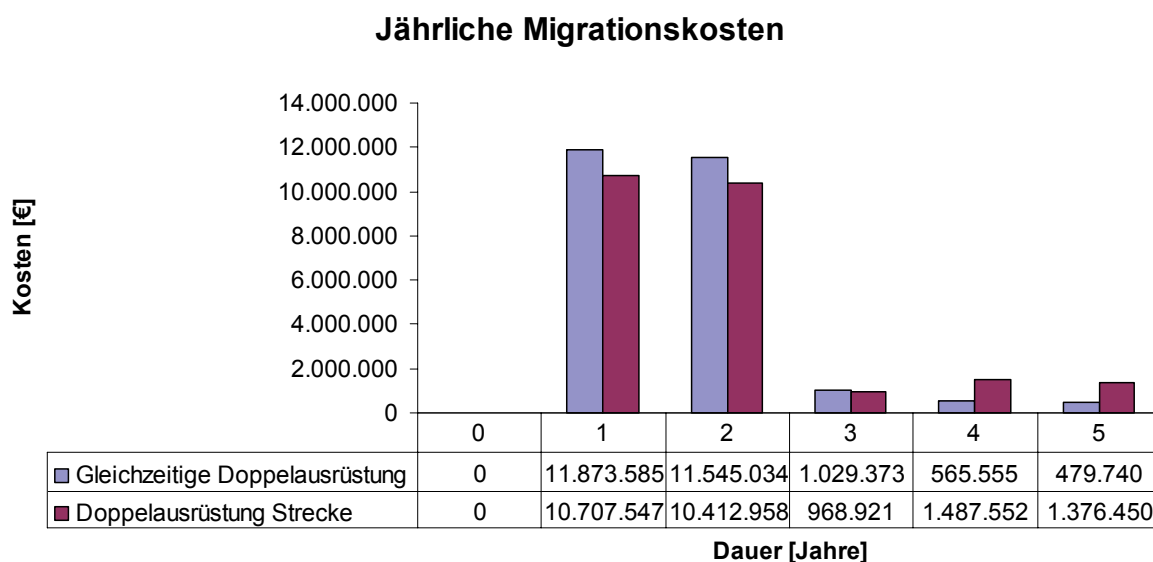


Abbildung 35: Jährliche Migrationskosten Abschnitt 1

Aufgrund einer niedrigen Anzahl von Fahrzeugen ist der Unterschied zwischen diesen beiden Migrationsstrategien relativ gering. Die Abbildung 36 zeigt die resultierenden und auf Basis der Berechnungsvorschriften aus 5.2 errechneten Migrationskosten. Die Rückbaukosten für das Fahrzeugsystem sind hier vernachlässigt worden, weil davon ausgegangen werden kann, dass dies im selben Arbeitsgang mit der ETCS-Installation mit geringem Mehraufwand durchgeführt werden kann.

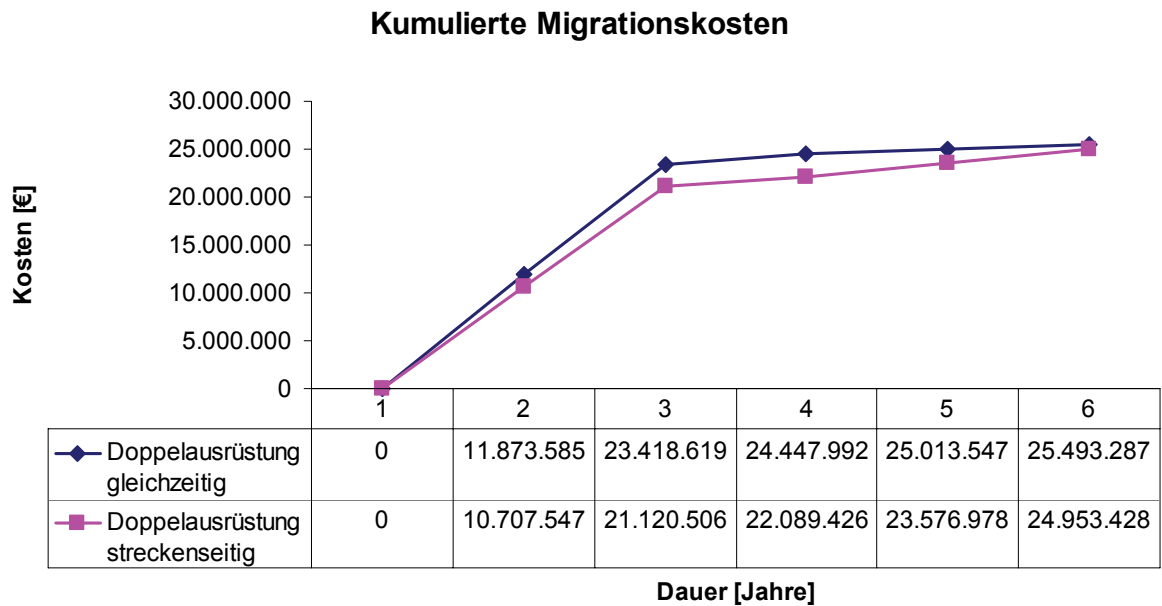


Abbildung 36: Kumulierte Migrationskosten Abschnitt 1

Da in diesem Beispiel die Kennzahl Migrationsdauer mit 5 Jahren (Jahr 1 ist das Basisjahr) für beide Strategien identisch ist, können die Migrationsstrategien allein anhand der Kennzahl Migrationskosten bewertet werden. Aufgrund dieser Besonderheit ist eine Portfoliodarstellung an dieser Stelle nicht notwendig. Die Vorteilhaftigkeit der Migrationsstrategie Doppelausrüstung streckenseitig mit den sequentiellen Abläufen

- Doppelausrüstung Streckenseite mit ETCS Level 2 zusätzlich zur PZB und
- Umrüstung Fahrzeuge von der PZB zum ETCS Level 2

wird in der Kostenersparnis von ca. **540.000 Euro** begründet. Dieses Ergebnis hat ausschließlich in Verbindung mit den o. g. Annahmen und Randbedingungen seine Gültigkeit. Somit würde für den Schritt der Systemselektion die Strategie **Doppelausrüstung Streckenseitig** weiter verwendet werden. Dieses Anwendungsbeispiel charakterisiert sich zusätzlich durch die deutlich höheren Kosten, die im Rahmen der streckenseitigen Ausrüstung anfallen (s. den Kurverbereich für die Jahre 1 bis 3) im Vergleich zu den Kosten der Fahrzeugumrüstung, die den flachen Kurverbereich (Jahre 4 bis 6) determinieren.

Eine inverse Situation hinsichtlich der Vorteilhaftigkeit der beiden Strategien kann bei einer größeren Anzahl von betroffenen Fahrzeugen bzw. einem größeren streckenseitigen Mengengerüst entstehen, unter der Randbedingung, dass

- die gleichzeitige Doppelausrüstung eine signifikant kürzere Migrationsdauer und somit auch die Dauer der Doppelausrüstung aufweist,
- die Instandhaltungskosten des Altsystems signifikant höher sind als die entsprechenden ETCS-Kosten und
- der Kalkulationszinssatz nicht so hoch gewählt ist, dass spätere Investitionen bereits dadurch als relativ vorteilhafter errechnet werden.

Abschnitt 4

Im Rahmen der Bewertung des Abschnitts 4 müssen sowohl unterschiedliche Zielsysteme wie auch unterschiedliche Migrationsstrategien berücksichtigt werden. Die aufkommenden Migrationskosten für die Systemausprägung Level 1 Limited Supervision können der Abbildung 37 und der Abbildung 38 entnommen werden. Dabei wird aufgrund der größeren Mengengerüste – sowohl auf der Fahrzeug- als auch auf der Streckenseite – ein größerer Unterschied zwischen den betrachteten Strategien als im Abschnitt 1 deutlich. Die Migrationsdauer verändert sich dabei wiederum nicht (Jahr 0 als Basisjahr).

Jährliche Migrationskosten LS

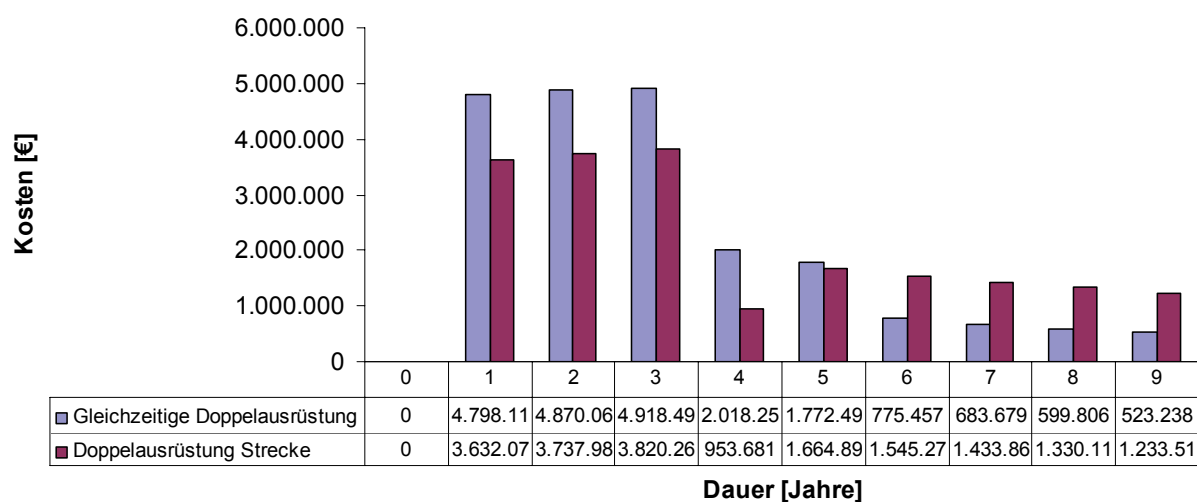


Abbildung 37: Jährliche Migrationskosten Abschnitt 4 Limited Supervision

Kumulierte Migrationskosten LS

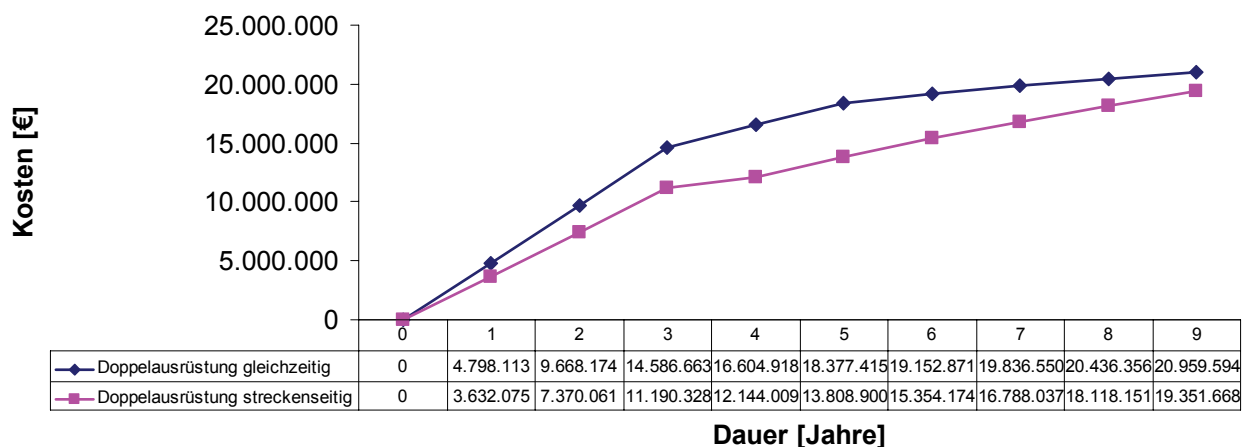


Abbildung 38: Kumulierte Migrationskosten Abschnitt 4 Limited Supervision

Die Diagramme für die Systemalternativen ETCS Level 1 und ETCS Level 2 finden sich im Anhang wieder. Bei der Migration zum ETCS Level 2 ist zusätzlich zu beachten, dass die vorhandenen RSTW durch die elektronische Stellwerkstechnik ersetzt werden müssen und somit zusätzliche Investitionen notwendig sind (s. dazu auch 5.2). Dazu wird angenommen, dass auf

dem Streckenabschnitt 4 in den Bahnhöfen und weiteren Betriebsstellen ca. 200 Stelleinheiten gesteuert werden. Bei einem Durchschnittspreis von 150.000 Euro / STE [11] erzeugt das eine Investition (Anschaffungskosten) von 30 Mio. Euro, die in den Migrationskosten berücksichtigt werden müssen. Es wird angenommen, dass das ESTW-Projekt im ersten Jahr des Migrationsprozesses beauftragt wird und die Anschaffungskosten zu dem Zeitpunkt auch berücksichtigt werden.

Die Bestandsveränderungen der strecken- sowie der fahrzeugseitigen Systeme für die Migrationsstrategie *Doppelausrüstung Strecke* werden toolseitig automatisch generiert und sind in der Abbildung 39 dargestellt.

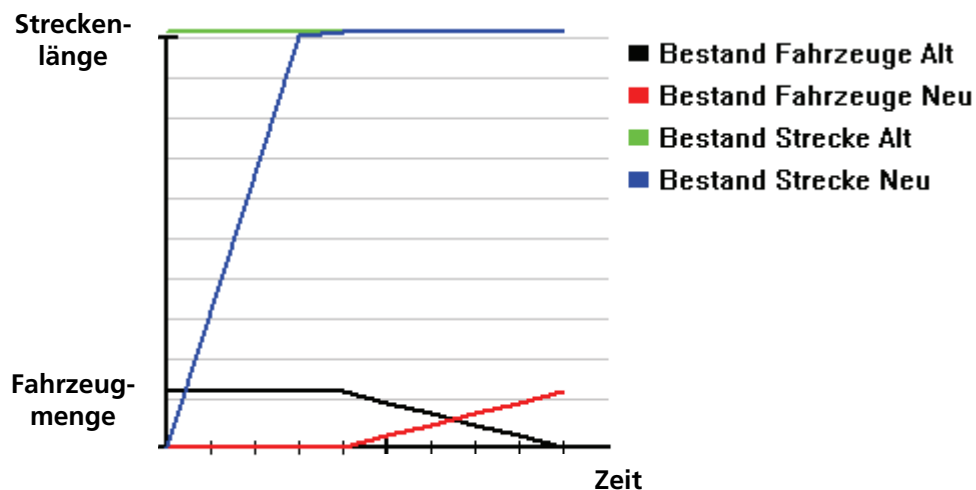


Abbildung 39: Bestandsveränderungen Altsystem und ETCS Auf dem Abschnitt 4 des Beispielkorridors für die Migrationsstrategie Doppelausrüstung Streckenseitig

Zum Vergleich wird eine zusätzliche – auf Basis der gesetzten Randbedingungen nicht zulässige – Strategie hinzugefügt. Dabei handelt es sich um die Basisstrategie „Fahrzeugseitige Doppelausrüstung“ (s. dazu auch 4.3), die auch den Rückbau der streckenseitigen Altsysteme beinhaltet. Somit ist hier der Migrationsprozess erst dann abgeschlossen, wenn sowohl die Strecke als auch die beteiligte Fahrzeugflotte nur noch mit ETCS ausgerüstet sind. Bei derartigen Strategien kann der Effekt beobachtet werden, dass mit dem Rückbau der in der Regel wartungsintensiveren Altsysteme jährliche Migrationskosten negativ werden (s. dazu auch die Abbildung 32, Seite 80). Die Begründung dafür liegt im Vergleich des Migrationsszenarios mit dem Weiterführungsszenario und der Berechnung der Migrationskosten als Differenz aus diesen beiden Kennzahlen. Der Nachteil solcher Strategien ist die längere Migrationsdauer (s. dazu auch 4.3) oder auch die niedrigere betriebliche Flexibilität durch den Rückbau der Altsysteme.

Eine Optimierung der Rückbauprozesse und somit auch die Minimierung von Rückbaukosten kann auf Basis der Synchronisation mit den Aktivitäten der präventiven Instandhaltung erreicht werden. Dabei können zumindest die Fahrkosten sowie teilweise die Personalaufwände verringert werden. In Teilnetzen, in denen nicht die Migrationsdauer als Kennzahl sondern in erster Linie der Zeitpunkt des Erreichens einer interoperablen Lösung entscheidungsrelevant ist, kann eine derartige Strategie zur Reduzierung von Migrationskosten (bei nahezu konstant

bleibenden Investitionsbedarfen) angewendet werden. Als Beispiel dafür können die ETCS-Güterverkehrskorridore A bis F genannt werden, für deren Umsetzung die Inbetriebnahmetermine der ETCS-Streckenausrüstung auf europäischer Ebene koordiniert werden.

Die Ergebnisse der Bewertung sind in der Tabelle 7 zusammen gefasst.

Zielsystem	Migrationskosten [Mio. €]			Migrationsdauer [Jahre]		
	D_G	D_S	D_F	D_G	D_S	D_F
ETCS Level 1 LS	20,96	19,35	9,32	9	9	14
ETCS Level 1	29,50	27,89		9	9	
ETCS Level 2	71,24	69,64		9	9	

Tabelle 7: Ergebnisse der Bewertung von Migrationsstrategien

D_G: Doppelausrüstung gleichzeitig

D_S: Doppelausrüstung der Streckenseite zuerst

D_F: Doppelausrüstung fahrzeugseitig mit Umrüstung der Streckenseite; diese Strategie ist auf Basis der Randbedingung des Beispiels nicht zulässig und dient nur dem theoretischen Vergleich

In der Abbildung 40 ist die jeweils vorteilhaftere der beiden Migrationsstrategien für die potentiellen Zielsysteme dargestellt. Dabei handelt es sich – wie bereits für die Konstellation im Abschnitt 1 – um die Strategie Doppelausrüstung Streckenseitig. Aufgrund der im Zusammenhang mit dem Abschnitt 1 diskutierten Struktur des Beispiels kommt diese homogene Strategiewahl zustande. Bei einem weniger restriktiven Streckenabschnitt und der Zulässigkeit des Rückbaus der Altsysteme wäre die hier zusätzlich dargestellte Vergleichsstrategie aus den Kostengesichtspunkten eine Optimierungsmöglichkeit für alle potentiellen Zielsysteme.

Portfoliodarstellung Kennzahlen Streckenabschnitt 4

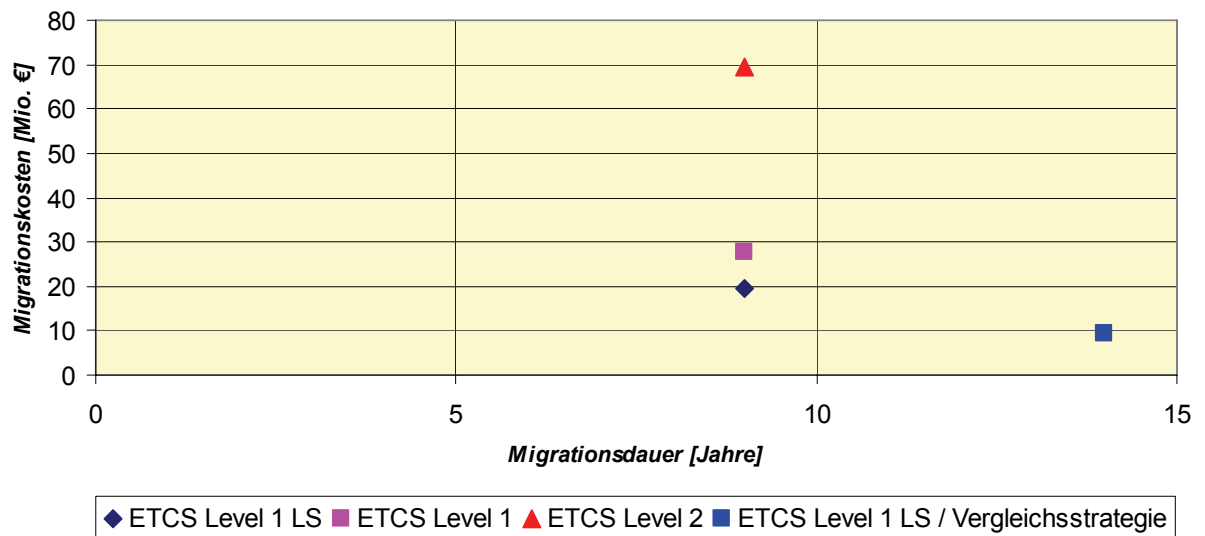


Abbildung 40: Vergleich der Migrationsszenarien für den Streckenabschnitt 4

5.5 Ermittlung der Sensitivität von Kennzahlen

Bei der Bewertung von Migrationsstrategien treten aufgrund der unzureichenden Datenverfügbarkeit bzw. der stark differierenden Angaben über bestimmte Einflussfaktoren und deren künftige Entwicklung Unsicherheiten über die Verlässlichkeit der gewonnenen Kennzahlen auf. Dies bezieht sich u. a. auf

- die gegenwärtigen Anschaffungskosten bestimmter Systemkomponenten, die projektbezogen starke Differenzen aufweisen,
- die künftige Entwicklung der Instandhaltungskosten und somit auch eines relevanten Anteils an LCC,
- Aus- bzw. Umrüstungskapazitäten sowie
- den anzusetzenden Kalkulationszinssatz.

Weitere Inputgrößen, wie z. B. die Lebensdauer der Systeme, werden unter einer zu definierenden Annahme (größer als die Migrationsdauer) als nicht variabel angenommen. Zusätzlich wird die gesamte LC-Untersuchung auf einen im Vorfeld zu vereinbarenden Zeitraum (Bsp. 20 Jahre) limitiert. Auf diese Art kann die Komplexität der Variation von unsicheren Inputdaten zum Teil begrenzt werden.

Für die Strukturierung dieser unterschiedlichen Datenkonstellationen und somit auch für die Ermittlung der Sensitivität von Ergebniskennzahlen Migrationskosten und -zeit soll die Morphologie der Daten dargestellt werden.

Morphologisches Merkmalsschema

Die im Rahmen der Strukturierung und Darstellung möglicher Ausprägungen von Prozess-

oder Systemeigenschaften häufig angewendete Modellierungsmethode ist das morphologische Merkmalsschema (Abbildung 41). Hiermit lassen sich anhand mehrerer Matrizen mit $M = (a_{i,j})$ strukturiert Systemvarianten darstellen. Im Rahmen der hier relevanten Anwendung kann die oben beschriebene Datenbasis als *System* definiert werden. Jede Matrix enthält in der ersten Spalte den so genannten Merkmalsvektor $\vec{A} = (a_{i,1})$.

Dieser enthält alle jeweilig relevanten Systemaspekte – hier Kennzahlen wie Anschaffungs- oder Instandhaltungskosten etc. Ihnen werden in den zugehörigen Zeilen mögliche Ausprägungsvarianten zugeordnet. Es entstehen so genannte Ausprägungsvektoren. Es gilt:

$$\vec{A}_1 = (a_{1,2}, \dots, a_{1,m_1+1}) \quad m_1 \text{ Ausprägung zum ersten Systemaspekt} \quad (31)$$

$$\vec{A}_2 = (a_{2,2}, \dots, a_{2,m_2+1}) \quad m_2 \text{ Ausprägung zum zweiten Systemaspekt etc.} \quad (32)$$

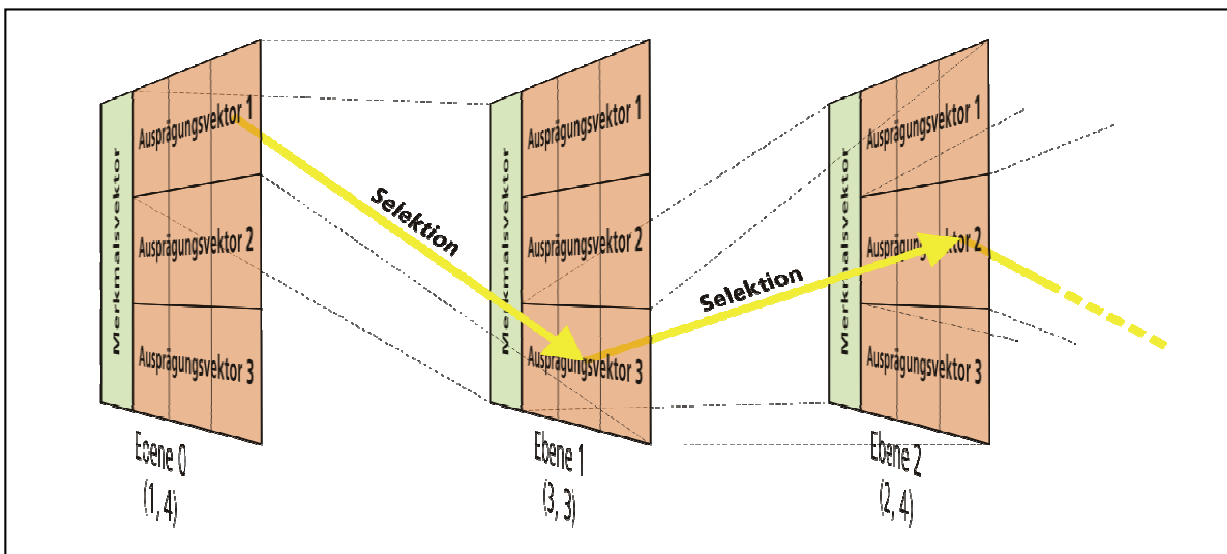


Abbildung 41: Aufbau des Morphologischen Merkmalsschemas [25]

Die Matrizen sind in der Form miteinander verbunden, dass ein Ausprägungsvektor einer höheren bzw. abstrakteren Ebene auf der nächst niedrigeren Ebene als Merkmalsvektor fungiert. Somit wird ausgehend von abstrakten, allgemeinen Systemaspekten schrittweise eine Verfeinerung der Modellinformationen erreicht. Ein einzelner Aspekt wird dann durch einen Pfad durch die einzelnen Matrizen von der abstraktesten hin zur am meisten detaillierten Matrixebene beschrieben. Eine Systemvariante wird durch die Gesamtheit der Pfade gegeben, die alle Systemaspekte beschreiben. Weitere Systemalternativen werden durch die gleiche Vorgehensweise, aber unterschiedliche Wahl der Ausprägungsvektoren auf den untergeordneten Ebenen ermittelt. Dieses mehrstufige Vorgehen ist insbesondere für die Modellierung von hierarchisch aufgebauten technischen Systemen geeignet [45].

Diese Modellierungsmethode soll hier als Mittel für die Beschreibung der Parameterräume im Rahmen der Sensitivitätsanalyse ihre Anwendung finden. Dabei ist der Matrixaufbau in *einer* Ebene ausreichend. Die unterschiedlichen Ausprägungen der Merkmale

- Anschaffungskosten ETCS-Komponenten streckenseitig [€/km]

- Anschaffungskosten ETCS-Komponenten fahrzeugseitig [€/Fahrzeug]
- Jährliche Instandhaltungskosten ETCS-Komponenten streckenseitig [€/km]
- Jährliche Instandhaltungskosten ETCS-Komponenten fahrzeugseitig [€/Fahrzeug]
- Jährliche Umrüstungskapazitäten streckenseitig [km]
- Jährliche Umrüstungskapazitäten fahrzeugseitig [Fahrzeuge]

können in einem morphologischen Kasten dargestellt werden. Auf die Variation des Kalkulationszinssatzes wird an dieser Stelle verzichtet. In den Fachdisziplinen Investition und Finanzierung der Betriebswirtschaftslehre wird die Wahl des Kalkulationszinssatzes hinreichend diskutiert – dies soll jedoch nicht im Fokus dieser Arbeit stehen.

Durch die Kombination der verschiedenen Faktorausprägungen entstehen mögliche Szenarien. Da aber nicht alle Kombinationen sinnvoll sind oder sich sogar ausschließen können, bzw. mehrere Kombinationen aufgrund ihrer Ähnlichkeit oder Bedeutung zusammengefasst werden können, soll eine Beschränkung der weiteren Untersuchung auf ausgesuchte Szenarien stattfinden. Dieser Prozess ist kreativ und kann in Workshops und basierend auf Expertenmeinungen durchgeführt werden. Die aktuelle Datenlage hinsichtlich der Kosten der ETCS-Ausrüstung ist relativ unsicher und variiert stark in Abhängigkeit der Projekt- sowie der Systemhersteller-Konstellation. Die Tabelle 8 zeigt einen in der Expertenrunde identifizierten Auszug aus der Vielfalt der bislang aufgetretenen oder angenommenen Datensätze.

Merkmal	Ausprägung 1	Ausprägung 2	Ausprägung 3
$A_{f,t}^n$	ETCS Level 1 LS: 300.000 € ETCS Level 1: 300.000 € ETCS Level 2: 300.000 €	ETCS Level 1 LS: 250.000 € ETCS Level 1: 200.000 € ETCS Level 2: 200.000 €	ETCS Level 1 LS: 320.000 € ETCS Level 1: 320.000 € ETCS Level 2: 350.000 €
$A_{s,t}^n$	ETCS Level 1 LS: 70.000 € ETCS Level 1: 120.000€ ETCS Level 2: 220.000 €	ETCS Level 1 LS: 50.000 € ETCS Level 1: 100.000€ ETCS Level 2: 200.000 €	ETCS Level 1 LS: 100.000 € ETCS Level 1: 150.000€ ETCS Level 2: 250.000 €
$W_{f,t}^n$	ETCS Level 1 LS: 9.000 € ETCS Level 1: 9.000 € ETCS Level 2: 9.000 €	ETCS Level 1 LS: 5.000 € ETCS Level 1: 5.000 € ETCS Level 2: 5.000 €	ETCS Level 1 LS: 10.000 € ETCS Level 1: 10.000 € ETCS Level 2: 10.000 €
$W_{s,t}^n$	ETCS Level 1 LS: 7.000 € ETCS Level 1: 9.000 € ETCS Level 2: 7.000 €	ETCS Level 1 LS: 5.000 € ETCS Level 1: 7.000 € ETCS Level 2: 5.000 €	ETCS Level 1 LS: 10.000 € ETCS Level 1: 15.000 € ETCS Level 2: 10.000 €
$n_{f,t}^n$	4 Fahrzeuge im Jahr	10 Fahrzeuge im Jahr	2 Fahrzeuge im Jahr
$l_{s,t}^n$	50 Strecken-km im Jahr	100 Strecken-km im Jahr	20 Strecken-km im Jahr

Tabelle 8: Beispiel der verschiedenen Datenausprägung der ETCS-Kennzahlen

Die Kombination der Ausprägung 1 der verschiedenen Kennzahlen stellt das im Abschnitt 5.4 kalkulierte Szenario dar. Die Identifikation der verlässlichen Datengrundlage soll nicht im Be-

trachtungsbereich dieser Arbeit stehen – es sollen weiterhin das Phasenmodell und die dazugehörige Bewertungsmethodik fokussiert bleiben.

Die ausgewählte Datenkonstellation dient als Input für die toolunterstützte Bewertung von Migrationsstrategien. Somit erhalten wir für jede Systemalternative und jedes Datenszenario die optimale Migrationsstrategie (Kapitel 5 und Abbildung 33Abbildung 33).

Allgemein wird bei den Analysen deutlich, dass die Anschaffungskosten der strecken- sowie der fahrzeugseitigen Ausrüstung den kritischen Faktor bei der Sensitivität einzelner Strategien darstellen. Die Abbildung 42 zeigt die Entwicklung der Migrationskosten in Abhängigkeit der in der Tabelle 8 dargestellten Ausprägungen der Anschaffungskosten für die fahrzeug- sowie die streckenseitige Ausrüstung.

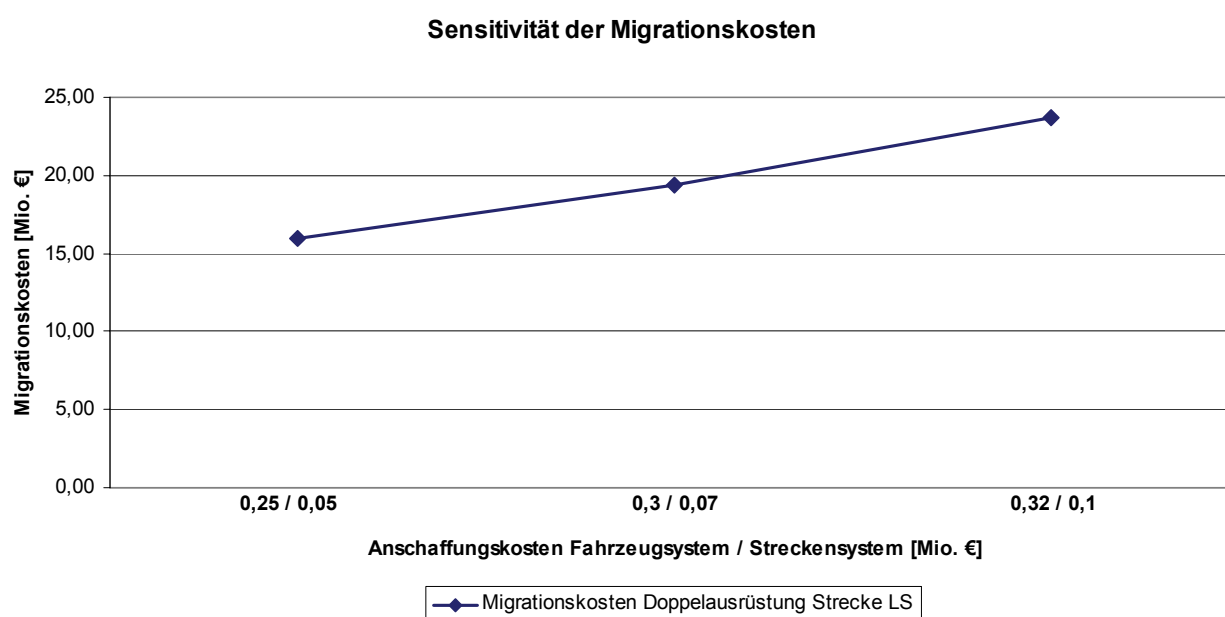


Abbildung 42: Sensitivität der Migrationskosten in Abhängigkeit der Anschaffungskosten

Für weitere Analysen wird die Ausprägung 1 weiter verwendet. Somit ist eine hinreichende Basis für die Anwendung der Methodik gewährleistet.

6 Systemselektion

Im Abschnitt 3 wurde bereits die Methode der EWA eingeführt. Während in dem dort vorgestellten Prozessschritt lediglich die Ausschlusskriterien für die Vorselektion verwendet wurden, wird hier die gesamte EWA durchgeführt. Mittlerweile sind in den vorangestellten Prozessschritten die Kennzahlen wie Migrationskosten und -zeit für die zu untersuchenden Systemalternativen berechnet worden, so dass ein erstellter Zielkatalog jetzt vollständig bewertet werden kann.

Der Zielkatalog besteht einerseits aus

- den priorisierten und somit auch gewichteten nicht-monetären Kriterien (betriebliche Anforderungen, Migrationsdauer, skalierbare Kriterien aus anderen Bereichen etc.) sowie
- den monetären Kennzahlen LCC und den Migrationskosten.

Die migrationsbezogenen Kennzahlen werden durch die Entwicklung und Bewertung der Migrationsstrategien softwaregestützt errechnet (s. Abschnitte 4 und 5). In einem nächsten Schritt gilt es, die LCC der jeweiligen potentiellen Zielsysteme zu ermitteln. Anschließend werden die monetären Kriterien LCC und Migrationskosten gewichtet und daraus ein Wert gebildet.

$$EWA_{Mon} = LCC \cdot x_1 + C_{f/s} \cdot x_2; \quad x_1 + x_2 = 1 \quad (33)$$

Dabei sind x_1 und x_2 spezifische Gewichtungsfaktoren der jeweiligen Anwendung bzw. des jeweiligen Entscheiders für die beiden monetären Kennzahlen. Das Ergebnis ist ein €-Wert. Eine Addition dieser beiden Werte ist insofern nicht zulässig, als dass die beiden Kennzahlen zum Teil die gleichen Komponenten besitzen. Aus diesem Grund und zwecks Gewährleistung der Berücksichtigung der jeweiligen anwendungsbezogenen Affinitäten wird hier durch die Gewichtung der beiden Faktoren eine neue Kennzahl gebildet.

Andererseits wird für die nicht-monetären Kriterien eine Nutzwertanalyse durchgeführt, bei der die Systemalternativen jeweils einen Punktwert erhalten. Da diese beiden Bewertungsskalen nicht miteinander direkt vergleichbar sind – einerseits ein konkreter monetärer Wert, andererseits ein Punktwert – wird hier wie bei der Bewertung von Migrationsstrategien eine Portfoliodarstellung mit den beiden Führungsgrößen

- monetäre Ebene der EWA und
- Nutzwertpunkte

angewendet (Abbildung 43).

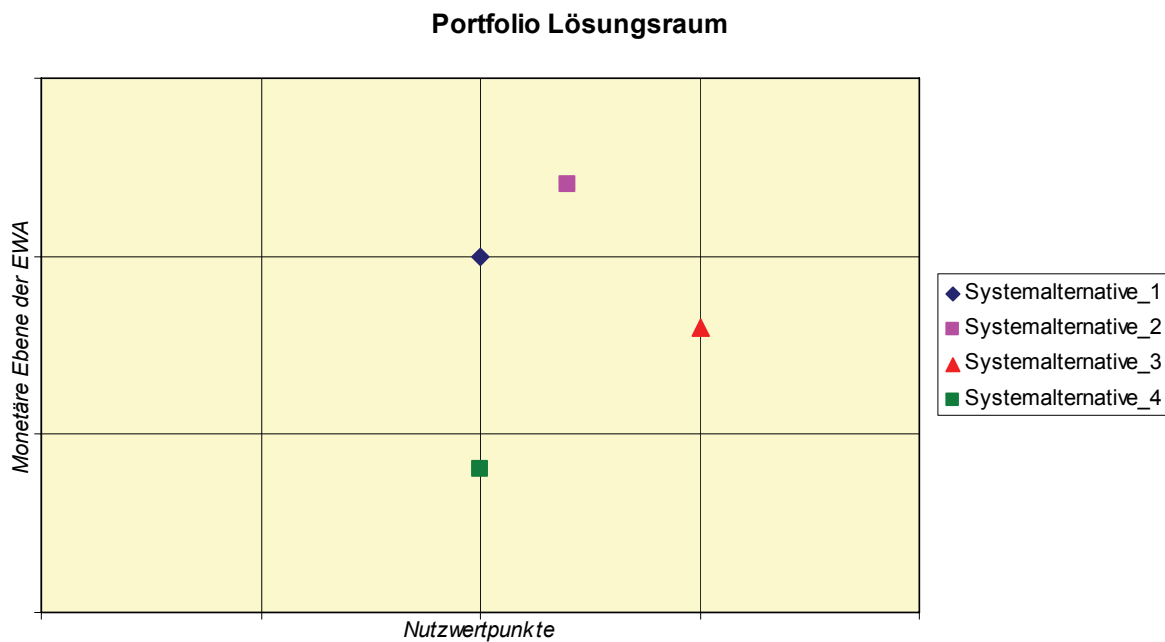


Abbildung 43: Portfoliodarstellung des Lösungsraumes als Entscheidungsunterstützung

Entsprechend den Präferenzen des Entscheiders hinsichtlich der Priorisierung der beiden Führungsgrößen im Portfolio kann daraus das optimale Zielsystem ausgewählt werden. Im Folgenden werden die verschiedenen Systemalternativen bewertet, die im Rahmen der ETCS-Einführung auf dem Beispielkorridor (Abschnitt 5.4) im Betrachtungsraum enthalten sind.

6.1 Fallstudie ETCS

Die Selektion eines Zugbeeinflussungssystems wird sowohl von den Randbedingungen als auch von den an ein solches System gestellten Anforderungen beeinflusst. Während im Abschnitt 3 im Rahmen der System-Vorselektion die Randbedingungen betrachtet werden, sollen in dem hier dargestellten Schritt der Selektion die Anforderungen an das System und der daraus generierte Zielkatalog fokussiert werden. Der Katalog an Bewertungskriterien ist an dieser Stelle immer von den Anforderungen des jeweiligen Entscheidungsträgers und den Eigenschaften der jeweiligen Anwendung abhängig. Die im Folgenden beschriebenen Kriterien sollen die bereits vorgestellten methodischen Schritte der EWA-Anwendung verdeutlichen und somit die im Abschnitt 3.1.4 unter a, b und c genannten Arten von Bewertungskriterien beinhalten.

Neben der in die monetäre Ebene einfließenden Kennzahlen (s. oben) handelt es sich um folgende Kriterien:

- Kostenbeeinflussung des Systems LST
- Streckenkapazität
- Migrationsdauer

Als Anwendungsgebiet wird hier der Abschnitt 4 des im Kapitel 5.4 dargestellten Korridors gewählt. Dabei soll das Zielsystem aus den drei ETCS-Systemausprägungen

- ETCS Level 1,
- ETCS Level 1 LS und
- ETCS Level 2

ausgewählt werden. Wie oben bereits definiert, findet der Rückbau von PZB nicht statt. Im Folgenden werden die Bewertungskriterien einzeln beleuchtet.

6.1.1 Monetäre Ebene der EWA: Lebenszyklus- und Migrationskosten

Seit 1999 sind der Begriff der Lebenszykluskosten und das damit verbundene Lebenszykluskonzept normiert. Nach DIN EN 60300-3-3 sind Lebenszykluskosten (engl.: Life Cycle Costs (LCC)) eines Produktes bzw. einer Anlage die kumulierten Kosten über seinen / ihren Lebenszyklus. Als Lebenszyklus wird dabei das Zeitintervall zwischen der Konzipierung und der Aussonderung eines Produkts verstanden. Er beinhaltet somit neben den fast ausschließlich für den Hersteller relevanten Phasen Produktkonzeption, Produkt- bzw. Anlagenentwicklung sowie Herstellung auch die vorrangig den Betreiber betreffenden Phasen im Marktzyklus. Diese sind die Inbetriebnahme, Nutzung und Entsorgung [14].

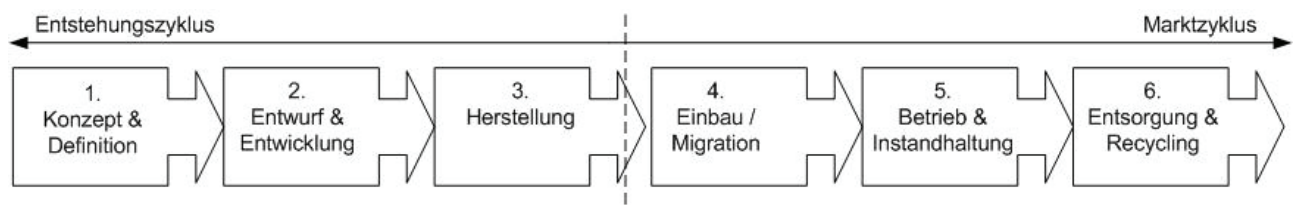


Abbildung 44: Produktlebenszyklusphasen (in Anlehnung an [14])

Im Rahmen der hier durchzuführenden Systemauswahl wird die Sicht des Systembetreibers (streckenseitige Ausrüstung – EIU, fahrzeugseitige Ausrüstung – EVU) mit den entsprechenden Besitzkosten betrachtet. Dies ist insofern ausreichend, als dass es sich dabei um die LCC-Anteile handelt, die für den Systemvergleich für den in dieser Arbeit adressierten Entscheider (Bahngesellschaft) relevant sind.

Die verfügbaren Kostensätze sind (s. dazu auch 5.4):

- Anschaffungskosten strecken- und fahrzeugseitig
- Instandhaltungskosten strecken- und fahrzeugseitig
- Kosten für Rückbau und Entsorgung am Ende des Lebenszyklus sollen auf Basis der fehlenden Datenbasis nicht berücksichtigt werden.
- Als technische Lebensdauer werden 20 Jahre angenommen, da dies die übliche technische Lebensdauer der elektronisch- bzw. Rechner-basierten LST (z. B. ESTW-Innenanlage) ist.

Somit ergibt sich folgende Berechnungsvorschrift:

$$LCC_{f/s} = A_{f,0}^{neu} + A_{s,0}^{neu} \sum_{t=0}^{20} (W_{f,t}^{neu} + W_{s,t}^{neu}) \cdot \frac{1}{(1+i)^t} \quad (34)$$

Für den Abschnitt 4 des betrachteten Korridors gelten die in der Tabelle 9 dargestellten Kennzahlen.

System	Anschaffungskosten	Diskontierte Instandhaltungskosten über 20a	LCC (Betreibersicht) über 20a
ETCS Level 1	24,24 Mio. Euro	16,8 Mio. Euro	41,04 Mio. Euro
ETCS L1 LS	16,64 Mio. Euro	13,52 Mio. Euro	30,16 Mio. Euro
ETCS Level 2	39,44 Mio. Euro	13,52 Mio. Euro	52,96 Mio. Euro

Tabelle 9: LCC / Anteil Betreiber

Gekoppelt mit den Ergebnissen der Bewertung von Migrationsszenarien im Kapitel 5.4, Tabelle 7, in denen die Migrationskosten der verschiedenen Systemalternativen ausgewiesen sind, kann die monetäre Kennzahl der EWA gebildet werden.

Unter der Annahme, dass im Rahmen der Bewertung die Migrationskosten und die LCC die gleiche Gewichtung erhalten ($x_1 = x_2$), wird die Kennzahl anhand der Berechnungsvorschrift aus 6 gebildet und in der Tabelle 10 dargestellt.

System	Migrationskosten	LCC (Betreibersicht) über 20a	EWA _{mon}
ETCS Level 1	27,89 Mio. Euro	41,04 Mio. Euro	34,47 Mio. Euro
ETCS L1 LS	19,35 Mio. Euro	30,16 Mio. Euro	24,75 Mio. Euro
ETCS Level 2	69,64 Mio. Euro	52,96 Mio. Euro	61,30 Mio. Euro

Tabelle 10: Kennzahl der monetären Ebene der EWA

Der Effekt im Falle des ETCS Level 2, dass die Migrationskosten die LCC übersteigen, ist in der Tatsache begründet, dass die Stellwerksanpassung in die Berechnung der Migrationskosten integriert ist, jedoch aber nicht zu den LCC des Systems ETCS gehört.

Das System ETCS befindet sich in Europa und explizit auch im Netz der DB AG in einer frühen Einführungsphase. Dies bedeutet auch, dass die internen Prozesse der Investitionsplanung für die Stellwerkstechnik weitgehend von der ETCS-Migrationsstrategie entkoppelt sind. So basiert die Stellwerksplanung in erster Linie auf der technischen Abgängigkeit der Altanlagen, die beispielsweise für die Relaisstechnik nach ca. 40 bis 50 Jahren im Betrieb erreicht ist. Eine auf diese Weise konzipierte Planung erzeugt einen zusätzlichen – durch die ETCS-Anforderungen getriggerten – Investitionsbedarf nach entsprechenden elektronischen Stellwerken für Level 2-Strecken. Deswegen sind diese investiven Ausgaben in die Berechnung von ETCS-Migrationskosten zu integrieren. Je nach der persönlichen Präferenz des Entscheiders bzw. auf Basis der verfügbaren Investitionsmittel für die Stellwerkstechnik kann dieser hohe Investitionsbedarf die Migration auf ETCS Level 2 erschweren.

6.1.2 Nutzwertanalytischer Teil der Bewertung

Für die Bewertungskriterien des nutzwertanalytischen Anteils gilt es zunächst, einzelne Kriterien zu gewichten (s. dazu auch 3.1.2). Dabei ist – trotz des grundsätzlich subjektiven Charakters dieses methodischen Schrittes – eine gewisse Systematisierung anzustreben.

Mit Hilfe des paarweisen Vergleichs der Kriterien kann der subjektive Anteil verringert werden (Tabelle 11). Die Beziehungen zwischen einzelnen Kriterien sind von der Affinität des jeweiligen Entscheidungsträgers sowie von der Konstellation im konkreten Anwendungsfall abhängig.

Kriterium 1 : Kriterium 2	Aussage
4:0	Kriterium 1 ist sehr viel wichtiger als Kriterium 2
3:1	Kriterium 1 ist wichtiger als Kriterium 2
2:2	Kriterium 1 und 2 sind gleich wichtig
1:3	Kriterium 1 ist unwichtiger als Kriterium 2
0:4	Kriterium 1 ist sehr viel unwichtiger als Kriterium 2

Tabelle 11: Punkteskala des paarweisen Vergleichs

In unserem Fall erzeugen die unten festgelegten Beziehungen zwischen den Kriterien die entsprechende Gewichtung (Tabelle 12).

	Kostenbeeinflussung des Systems LST	Kapazität	Migrationsdauer	Summe	Gewichtung [%]
Kostenbeeinflussung des Systems LST		3	3	6	50,0
Kapazität	1		2	3	25,0
Migrationsdauer	1	2		3	25,0
				12	100,0

Tabelle 12: Ergebnis des paarweisen Vergleichs

Kostenbeeinflussung des Systems LST

Eine der zentralen Herausforderungen im Umfeld der Eisenbahn-LST ist neben der hohen Variantenvielfalt die zunehmende Überalterung der Anlagen. Mit der heutigen Kostenstruktur und den finanziellen Rahmenbedingungen für Reinvestitionen kann die hohe Anzahl abgängiger Komponenten nicht in der notwendigen Geschwindigkeit ersetzt werden. Primäres Ziel im Bereich der Infrastruktur ist somit das Stoppen der fortschreitenden Überalterung des Anlagenbestandes, welche sich in einer kontinuierlichen Steigerung des durchschnittlichen Anlagenalters ausdrückt. Dieses Ziel kann jedoch angesichts der verfügbaren und mittelfristig eher abschmelzenden Mittel nicht erreicht werden. Der Ausweg aus dem Kreislauf von fehlenden Mitteln und immer älter werdender Technologie kann daher nur in der richtigen Mischung von Prävention und Kostenreduktion liegen. Auf der einen Seite soll mittels präventiver Instandhaltungsmaßnahmen die Lebensdauer der Techniken verlängert werden, so dass die Produktionsmittel (LST) mit gleichbleibender Qualität weiter eingesetzt werden können.

Auf der anderen Seite müssen die Kosten für Systemanschaffung bzw. Systemersatz (investiv) in die LST stark sinken, um den (Re-)Investitionsrückstau schrittweise abbauen zu können. Um eine nachhaltige Wirkung zu erzielen, ist bei neuen Techniken die Betrachtung der Lebenszykluskosten unabdingbar. Nur so kann ein Gleichgewicht von verfügbaren Mitteln und einer adäquaten Anlagenverfügbarkeit hergestellt werden.

Die Ausrichtung der LST-Strategie der Infrastrukturbetreiber soll demnach die beiden wesentlichen Herausforderungen des Reinvestitionsbedarfs auf der einen und der Einführung von ETCS auf der anderen Seite in ein neues Gleichgewicht überführen. Dies bedeutet auch, dass Möglichkeiten gefunden werden müssen, durch die ETCS-Einführung eine Kostensenkung im Bereich der LCC der Leit- und Sicherungstechnik zu realisieren.

Für die Kostenbeeinflussung der LST ist der Aspekt der Anpassung des Zugbeeinflussungssystems an die bestehenden Anlagen eine der zentralen Eigenschaften. Eine Entkopplung der

Investitionsprogramme ETCS und ESTW kann dabei in der aktuellen Phase der ETCS-Migration in Deutschland als Ziel formuliert werden.

Ein weiterer Aspekt ist der Verzicht auf die streckenseitige Signalisierung. Dabei werden entlang des Lebenszyklus Kostensenkungspotentiale sowohl im investiven (Anschaffungskosten) als auch im operativen Bereich (Instandhaltung, Spurplananpassung) erwartet (s. dazu auch Abschnitt 4.1.1, Abbildung 16).

Die Bewertung der Systemalternativen anhand des hier betrachteten Kriteriums kann nur bedingt quantitativ durchgeführt werden. Für eine qualitative Bewertung wird das Kriterium zunächst in die beiden Teilaspekte

- Entkopplung der ESTW-Investition von dem ETCS-Migrationsplan und
- Kostensenkung durch Verzicht auf streckenseitige Signalisierung

unterteilt, die gleichwertig behandelt werden sollen. Es wird festgelegt, dass der Teilnutzen maximal 10 Punkte betragen kann, die sich aus jeweils 5 Punkten je Teilaspekt zusammensetzen.

Dabei sind die spezifischen Eigenschaften der Systemalternativen bezüglich dieser Teilaspekte des Bewertungskriteriums in der Tabelle 13 dargestellt.

System	Entkopplung der Investitionsprogramme	Entfall der streckenseitigen Signalisierung
ETCS Level 1	Erfüllt	nicht erfüllt
ETCS Level 1 LS	Erfüllt	nicht erfüllt
ETCS Level 2	nicht erfüllt	erfüllt

Tabelle 13: Aspekte des Teilnutzens in der Kostenbeeinflussung der LST

Bei dem Teilaspekt des Entfalls der streckenseitigen Signalisierung ist zu beachten, dass dies nur dann realisiert werden kann, falls es sich im konkreten Anwendungsfall um eine Strecke handelt, auf der lediglich Fahrzeuge verkehren, die ETCS Level 2 fähig sind. Ein Mischverkehr würde hierbei keine Vorteile erzielen, da hier für die weiterhin national ausgerüsteten Fahrzeuge Signale beibehalten werden müssen.

Da es sich in der vorliegenden Fallstudie (Beispielkorridor, Abschnitt 4) um eine Strecke handelt, bei der kein Rückbau von PZB stattfindet, ist der Teilnutzen von ETCS Level 2 – trotz der theoretischen Option des Verzichts auf Signale – nicht generierbar. Deswegen gilt die folgende Teilnutzenverteilung in der Tabelle 14.

System	Teilnutzen
ETCS Level 1	5
ETCS Level 1 LS	5
ETCS Level 2	0

Tabelle 14: Teilnutzen Kostenbeeinflussung LST

Kapazität

Prognosen über nationale und europäische Verkehrsentwicklung für das System Schiene zeigen insbesondere im Güterverkehr für die nächsten Jahre signifikante Zuwächse auf. So wird beispielsweise auf dem Korridor Rotterdam – Genua von 2006 bis 2020 eine Verdoppelung des Transportvolumens in Mrd. Tonnenkilometer pro Jahr prognostiziert [61].

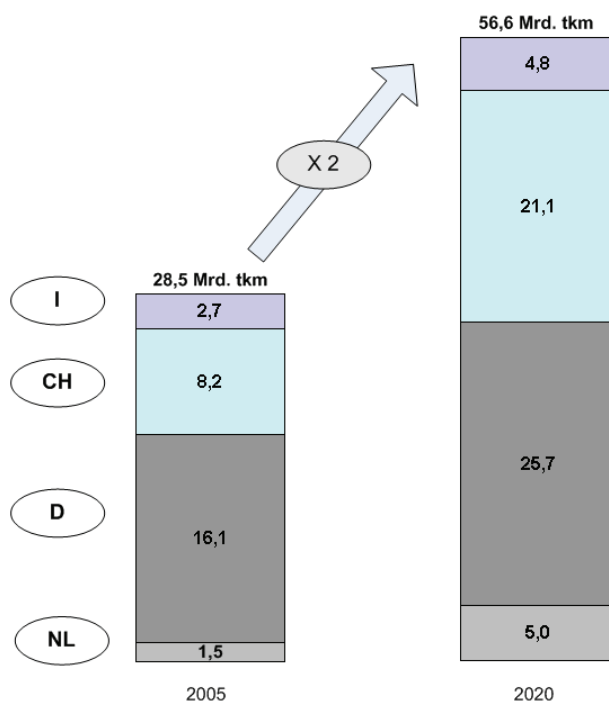


Abbildung 45: Verdopplung des Schienengüteraufkommens auf dem Korridor A (in Anlehnung an [61])

Dieser Umstand erzeugt die Forderung nach der Erhöhung der Kapazitäten der Schienenwege, zu der auch die Zugbeeinflussungssysteme ihren Beitrag leisten sollen. Es ist jedoch zu beachten, dass die meisten Kapazitätsengpässe in neuralgischen Punkten im Netz – Bahnhöfen und Knoten – auftreten. Diese punktuellen Engpässe können eher durch infrastrukturelle Maßnahmen (Aus- und Neubau der Gleisanlagen), Blockverdichtungen (s. dazu auch Abbildung 46, Abbildung 47), die zeitliche Entmischung von schnellen und langsamen Verkehren oder Umfahrungen realisiert werden.

In Expertenkreisen wird von der qualifizierten Annahme ausgegangen, dass die Systeme PZB und ETCS Level 1 bzw. LZB und ETCS Level 2 bei gleichen betrieblichen Randbedingungen

eine jeweils vergleichbare Kapazität aufweisen. Dabei wird von der Angleichung der Bremskurven im ETCS Level 1 an die Bremskurven der PZB ausgegangen.

Dabei können zunächst zwei Streckenkategorien unterschieden werden:

- Hochgeschwindigkeitsstrecken
- konventionelle Strecken

Die unter 3.2.2 dargestellten Anforderungen hinsichtlich der Zugbeeinflussungssysteme beziehen sich auf die deutsche nationale Betriebsordnung. Die Kapazitätsstudie [62] ist international ausgerichtet und berücksichtigt dabei für die HGV-Strecken auch ETCS Level 1 obwohl bei dieser Systemausprägung keine kontinuierliche Datenübertragung zwischen Strecke und Zug über die gesamte Streckenlänge gewährleistet ist.

Die Ergebnisse der Studie für die beiden o. g. Streckenkategorien sind in der Abbildung 46 sowie der Abbildung 47 zusammen gefasst.

Da der Fokus der vorliegenden Arbeit nicht in der Kapazitätsuntersuchung der LST liegt, wird hier auf die Diskussion der Ergebnisse verzichtet. Die spezifischen Randbedingungen sowie die Berechnungsvorschriften der Untersuchung können der Studie [62] entnommen werden.

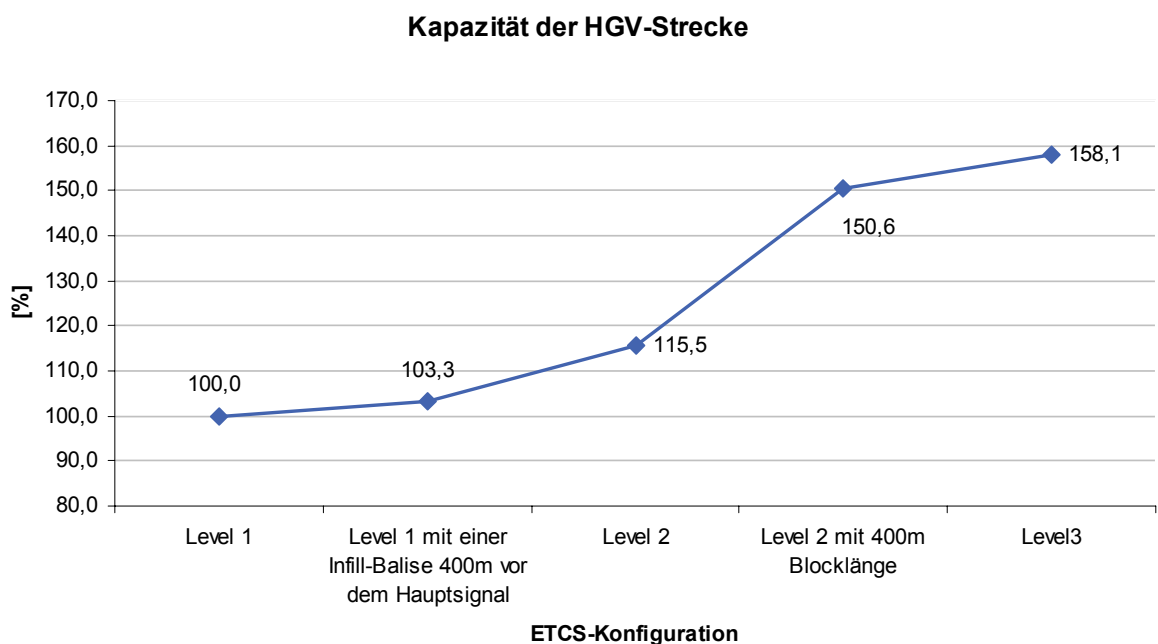


Abbildung 46: Kapazität einer HGV-Strecke [62]

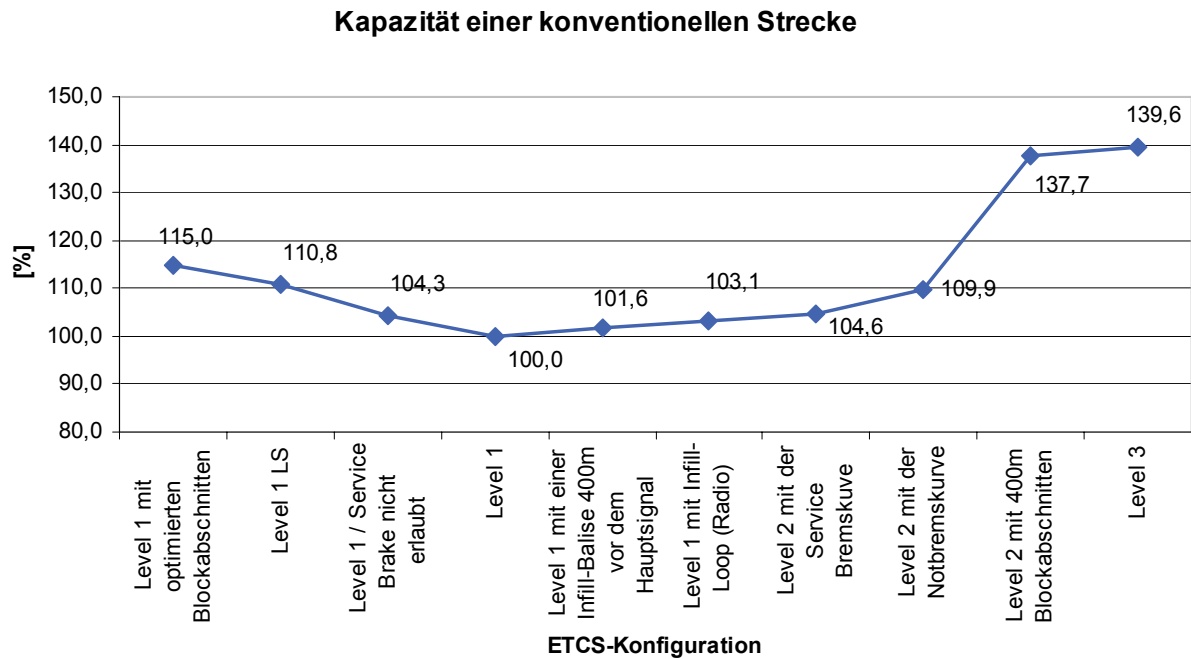


Abbildung 47: Kapazität einer konventionellen Strecke [62]

Im Rahmen der Untersuchung ist die Kapazität der ETCS Level 1 Konfiguration als 100% normiert und die übrigen Ergebnisse dazu ins Verhältnis gesetzt.

Diese Ergebnisse dienen in der vorliegenden Arbeit für eine qualifizierte Annahme hinsichtlich der Kapazitätsauswirkungen infolge der Ausrüstung mit einzelnen ETCS-Ausbaustufen.

Für die Ermittlung des Teilnutzens wird eine Intervallskala unter Anwendung der folgenden Transformationsfunktion der Kapazitätsergebnisse in Netzwertpunkte definiert:

$$TN_K = 1 + (KI - KI_{\min}) \cdot \frac{10 - 1}{KI_{\max} - KI_{\min}} \quad (35)$$

TN_K : Teilnutzen Kapazität

KI : Kapazitätsindex

Das Intervall wird dabei zwischen dem maximalen und dem minimalen Kapazitätsindex aufgespannt. Somit wird sowohl die relative als auch die absolute Vorteilhaftigkeit berücksichtigt. Dabei erhält die Systemvariante mit dem minimalen Kapazitätsindex einen Punkt und die Variante mit dem maximalen Kapazitätsindex 10 Punkte.

Der hier betrachtete Abschnitt 4 ist eine konventionelle Strecke, somit gilt:

$$KI_{\max} = 139,6; KI_{\min} = 100$$

Für das Zielsystem ETCS Level 2 wird die optimale Ausprägung mit der Verkürzung der Blocklänge betrachtet. Da für die Ausrüstung dieses Streckenabschnitts mit ETCS Level 2 ein Ersatz der vorhandenen Stellwerkstechnik durch elektronische Stellwerke erfolgen muss, kann eine solche Blocklängen Anpassung realisiert werden.

Der dabei von den einzelnen potentiellen Zielsystemen erreichte Teilnutzen ist in der Tabelle 15 dargestellt. Dabei werden die Werte in 0,5-Schritten auf- bzw. abgerundet.

System	Kapazitätsindex	Teilnutzen
ETCS Level 1	100	1
ETCS Level 1 LS	110,8	3,5
ETCS Level 2 (optimiert)	137,7	9,5

Tabelle 15: Teilnutzen Kapazität

Migrationsdauer

Eine weitere für die Bewertung einzelner Zielsysteme wichtige Kennzahl ist die Dauer des Migrationsprozesses. Aufgrund der nationalen Migrationspläne sowie der korridorbezogenen internationalen Abstimmung einzelner Bahngesellschaften, ist der zeitliche Rahmen hin zur Erreichung einer technischen Interoperabilität oder einer vollständigen Beendigung der Migration ein wichtiger Faktor. Dabei werden hier die im Abschnitt 5.4 / Tabelle 7 dargestellten Werte der jeweils relativ vorteilhafteren Migrationsstrategie sowie der Wert der Vergleichsstrategie für die drei möglichen Zielsysteme berücksichtigt.

Die Ermittlung des Teilnutzens erfolgt – wie bereits bei der Bewertung der Kapazität – anhand einer Intervallskala unter Anwendung der folgenden Transformationsfunktion der Migrationsdauer in Netzwertpunkte:

$$TN_D = 1 + (D_{\max} - D) \cdot \frac{10 - 1}{D_{\max} - D_{\min}} \quad (36)$$

TN_D : Teilnutzen Migrationsdauer

D : Migrationsdauer

Das Intervall wird dabei zwischen der maximalen und der minimalen Migrationsdauer aufgespannt. Somit wird sowohl die relative als auch die absolute Vorteilhaftigkeit berücksichtigt. Dabei erhält die Systemvariante mit der minimalen Migrationsdauer 10 Punkte und die Variante mit der maximalen Migrationsdauer einen Punkt.

Es gilt:

$D_{\max} = 14$ Jahre; $D_{\min} = 9$ Jahre

Der dabei von den einzelnen potentiellen Zielsystemen erreichte Teilnutzen ist in der Tabelle 16 dargestellt.

System	Migrationsdauer	Teilnutzen
ETCS Level 1	9 Jahre	10
ETCS Level 1 LS	9 Jahre	10
ETCS Level 2	9 Jahre	10
ETCS Level 1 LS (Vergleichsstrategie)	14 Jahre	1

Tabelle 16: Teilnutzen Migrationsdauer

Die „Vergleichsstrategie“ wird in der Bewertung nicht berücksichtigt.

In diesem Prozessschritt können auf Basis der spezifischen Anforderungen des jeweiligen Entscheiders weitere Bewertungskriterien hinzugezogen werden.

Auf Basis der angenommenen Gewichtung der einzelnen Kriterien sowie der oben errechneten Teilnutzen, kann der Nutzwert der drei Systemalternativen ermittelt werden (Tabelle 17).

Bewertungskriterium	Gewichtung [%]	ETCS Level 1	ETCS Level 1 LS	ETCS Level 2
Kostenbeeinflussung des Systems LST	50	5	5	0
Kapazität	25	1	3,5	9,5
Migrationsdauer	25	10	10	10
Nutzwert		5,25	5,875	4,875

Tabelle 17: Ergebnisse des nutzwertanalytischen Teils der EWA

Dieser Nutzwert sowie die monetäre Kennzahl EWA_{mon} können als Ergebnis der EWA in einem Portfolio dargestellt werden.

6.2 Schlussfolgerung über den optimalen Systemwechsel

Im letzten Schritt wird die bereits errechnete Migrationsstrategie für die gewählte Datenkonstellation und das selektierte Zielsystem dargestellt und die relevanten Kenngrößen dokumentiert.

Durch diese methodische Vorgehensweise wird die Problemstellung der Auswahl eines Zielsystems und der Durchführung des entsprechenden Systemwechsels optimiert. Das mehrdimensionale Optimierungsproblem der Migrationsprozesse in der Bahndomäne wird adressiert und systematisch behandelt.

Die Tabelle 18 und die Abbildung 48 stellen die Ergebnisse der Fallstudie zusammen.

System	Monetäre Ebene der EWA	Nutzwert
ETCS Level 1	34,47 Mio. Euro	5,25
ETCS Level 1 LS	24,75 Mio. Euro	5,875
ETCS Level 2	61,30 Mio. Euro	4,875

Tabelle 18: Ergebnis der EWA

Portfoliodarstellung EWA

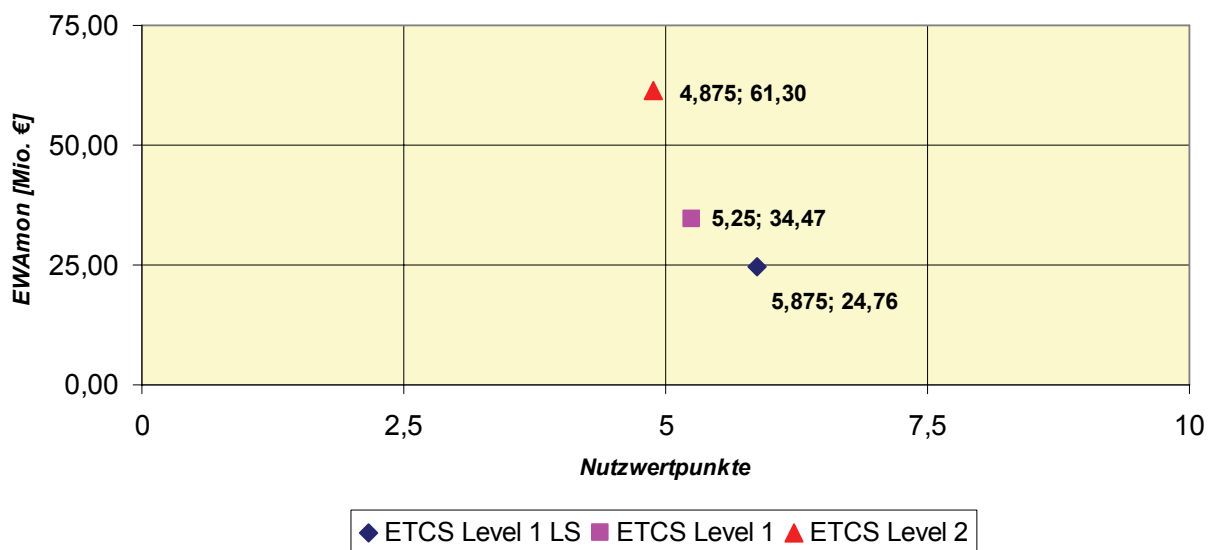


Abbildung 48: Ergebnis der EWA als Portfolio

Ausgehend von der getroffenen und oben beschriebenen Randbedingungen und Annahmen insbesondere hinsichtlich der Kostensätze auf der einen Seite sowie auf Basis der angewendeten Bewertungskriterien und ihrer Priorisierung andererseits wird in diesem Fall ein eindeutiges Ergebnis generiert.

Das Ranking der Zielsysteme kann wie folgt formuliert werden:

1. ETCS Level 1 Limited Supervision (weist niedrigste Kosten und höchsten Nutzwert aus)
2. ETCS Level 1 (mittlere Kosten, mittlerer Nutzwert)
3. ETCS Level 2 (höchste Kosten, niedrigster Nutzwert)

Die Gültigkeit dieses Ergebnisses ist nur unter Anwendung der hier beschriebenen Annahmen gewährleistet.

Dieses Ranking ist insofern eindeutig, als dass es unabhängig von den spezifischen Präferenzen des Entscheiders zwischen den monetären Aspekten einerseits und den Nutzwertpunkten

andererseits stets das gleiche Ergebnis liefert. Dieses Ergebnis ist als logische Konsequenz der definierten Randbedingungen sowie der getroffenen Annahmen auch als Bestätigung der hier vorgestellten Methodik und des damit einhergehenden systematischen und reproduzierbaren Vorgehens zu betrachten.

Ergebnis: ETCS Level 1 Limited Supervision / Doppelausrüstung streckenseitig

Nachfolgend sollen im Rahmen einer kritischen Diskussion die Vor- und Nachteile der hier identifizierten optimalen Lösung beleuchtet werden.

Diskussion

Die Kernanforderung von Eisenbahn-Infrastrukturunternehmen ist die Herstellung der technischen Interoperabilität auf definierten Strecken und Knoten in der vereinbarten Zeit (zeitoptimal) und zu vertretbaren Kosten (kostenminimal). Eine technische Option hierzu unter Berücksichtigung der betrieblichen Anforderungen ist der Ausrüstungsstandard Level 1 Limited Supervision (LS, s. dazu auch 2.4). Im Modus LS wird fahrzeugseitig die Bremskurve nicht kontinuierlich sondern lediglich an ausgewählten sicherheitsrelevanten Streckenabschnitten überwacht. Dies erfolgt in der Regel zwischen dem Vor- und dem Hauptsignal. Im Driver Machine Interface (DMI) wird nur die aktuelle Geschwindigkeit, jedoch nicht die Zielgeschwindigkeit oder der Zielpunkt angezeigt. Diese Vereinfachungen gestalten insbesondere die Projektierung der LEUs und der Balisen einfacher und somit kostengünstiger.

ETCS Level 1 Limited Supervision bietet gegenüber dem Level 2 einen weiteren wesentlichen Vorteil in der Entkopplung der Investitionen für ETCS und Stellwerke. Während beim Einsatz von ETCS Level 2 aufgrund der Schnittstelle zwischen dem Stellwerk und dem RBC in der Regel elektronische Stellwerke notwendig sind, kann im Zusammenhang mit Level 1 LS die bestehende Stellwerkstechnik weiter betrieben werden. Insbesondere im Bezug auf die Bestandsanlagen auf den ETCS-Korridorabschnitten – die häufig durch Relais-Stellwerke charakterisiert sind – kann durch den Entfall von vorzeitigen ETCS-getriggerten Stellwerks-Ersatzinvestitionen eine signifikante Senkung der Migrationskosten erreicht werden.

Darüber hinaus liegen die Vorteile von LS in einem geringen betrieblichen Anpassungsaufwand in Bahnhofsbereichen und in der Minderung des Frequenzmehrabbedarfes vor allem in Ballungsgebieten. Insbesondere bleiben alle Fahrwegelemente unverändert erhalten. Hinsichtlich der betrieblichen Leistungsfähigkeit erbringt ETCS L1 LS aufgrund der weniger restriktiven Bremskurven gewisse Vorteile gegenüber ETCS Level 1 Full Supervision.

Für die Entscheidung über den Einsatz von ETCS L1 LS müssen insbesondere folgende Kriterien bewertet werden:

- Betriebliche Machbarkeit

Systemeinsatz ist auf Streckenabschnitten mit einer Geschwindigkeit bis 160 km/h möglich. Sinnvoller Wechsel von Führerraum- und signalbasierter Anzeige nur nach für die Triebfahrzeugführer vertretbaren Streckenlängen. Das System bietet keine betriebliche Interoperabilität.

Insbesondere der letzte Punkt ist im Hinblick auf die angestrebte teilweise Harmonisierung von Betriebsregeln in Europa als kritisch anzusehen. Der Eisenbahnbetrieb unter Anwendung von LS orientiert sich weiterhin an den nationalen Betriebsregeln und der vorhandenen streckenseitigen Signalisierung. Dieser Umstand stellt den Harmonisierungsprozess – welcher ohnehin aufgrund einer Vielzahl an historisch gewachsenen nationalen Regeln problematisch verläuft – vor weitere Herausforderungen.

- Wirtschaftlichkeit (im Vergleich zu ETCS Level 2)

Dem Wegfall der Investitionen für STW-Anpassungen und -erneuerungen, der nur bei einer wirtschaftlich sinnvollen Restnutzungszeit der Bestandsstellwerke relevant ist, stehen ggf. erhöhte Wartungs- und Instandhaltungsaufwände durch die zusätzliche Infrastruktur im Feld sowie die Beibehaltung der Signale gegenüber. Hier ist fallweise eine spezifische Wirtschaftlichkeitsrechnung ratsam.

- Nachhaltigkeit

Erhöhung der Zugdichte und der damit einhergehende Bedarf an zusätzlicher Kapazität sind im Nachhinein nur durch Erhöhung der konventionellen Blockteilung möglich.

Grundsätzlich sind aufgrund der langfristigen Wirkung einer Entscheidung für LS auf bestimmten Streckenabschnitten weitere Aspekte zu betrachten, die über den Gegenstand der vorliegenden Arbeit hinausgehen und somit hier nicht im Detail beleuchtet werden sollen. Hierzu gehört beispielsweise die mittelfristige Planung der Stellwerksinvestitionen, die einen grundlegenden Einflussparameter für die Vorteilhaftigkeit von LS darstellt. Eine genaue Analyse der LZB-Ablösungsstrategie (Folgesystem voraussichtlich ETCS Level 2) ist ein weiterer Faktor, der gewisse Implikationen auf die Sinnfälligkeit von LS aufweist. Hier gilt es nach Möglichkeit, an den Schnittstellen der beiden Ausrüstungsstandards im Netz technologische Synergien im Zusammenhang mit den Stellwerken und den RBC zu realisieren.

Diese beiden hier genannten Beispiele machen deutlich, dass neben der offensichtlichen Vorteile des Ausrüstungsstandards ETCS Level 1 LS in der Migrationsphase auch stets kritische Aspekte analysiert werden müssen, um fallweise eine nachhaltig richtige Entscheidung zu treffen.

Die formale Voraussetzung für den Einsatz ist die Spezifikation SRS 3.0.0 und eine erfolgreiche Pilotierung des Systems.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Migration der Systeme der Eisenbahnleit- und -sicherungstechnik ist ein komplexer Prozess, in dessen Rahmen Entscheidungen hinsichtlich der Systemselektion sowie der Auswahl der jeweils optimalen Migrationsstrategie getroffen werden müssen. Dabei gilt es technische, betriebliche, politische und weitere Randbedingungen sowie Einflussparameter zu berücksichtigen – und dies unter der maßgebenden Forderung nach wirtschaftlicher Effizienz entlang des gesamten Lebenszyklus der Anlagen.

Dieser Entscheidungsprozess erfordert daher die Bereitstellung einer Methodik, um zu einer systematischen und objektiven Basis für die Entscheidungsträger zu gelangen.

Um dem steigenden Mobilitätsbedürfnis – insbesondere auch im grenzüberschreitenden Güter- und Personenverkehr – gerecht zu werden, muss die Effizienz des Schienenverkehrs erhöht werden. Die Interoperabilität des Systems Schiene ist dabei eine notwendige Voraussetzung, die u. a. eine Harmonisierung der Zugsicherungssysteme in Europa erfordert. Die Einführung des einheitlichen europäischen Zugbeeinflussungssystems ETCS soll diesbezüglich die technische Lösung liefern. Die Migration dieses Systems ist ein langwieriger und kostenintensiver Prozess, der nicht zuletzt aufgrund der Inkompatibilität des ETCS zu den abzulösenden nationalen Systemen sowie der verteilten Funktionsallokation besondere Herausforderungen an die Bahngesellschaften und die Systemlieferanten stellt.

Das Ziel dieser Arbeit war die Vorstellung einer durchgängigen Methodik für die systematische Unterstützung des oben genannten Entscheidungsprozesses im Rahmen der Systemselektion sowie der Entwicklung und Bewertung der Migrationsstrategien für Systeme der Eisenbahn-LST und insbesondere für ETCS. Eine Software-Unterstützung der ausgewählten Teilprozesse sollte die Effizienz der Methodik erhöhen.

Dabei konnte nach der Einordnung der Arbeit in das vorhandene wissenschaftliche und technische Umfeld der Prozess eines Systemwechsels in Form eines Phasenmodells strukturiert werden. Die gewählte Methodik der Trennung eines Systemwechsels in die beiden Teilprobleme Selektion und Migration i. e. S. hat sich als vorteilhaft erwiesen. Durch die sequentielle Bearbeitung wird die Komplexität der einzelnen Teilschritte verringert.

Im Rahmen der System-Vorselektion wurden das methodische Vorgehen und die dazugehörigen Instrumente vorgestellt. Da in dieser Phase die rechtlichen Randbedingungen ausschlaggebend für den Ausschluss der potentiellen Zielsysteme für den Migrationsprozess sind, hat eine Abbildung dieser Aspekte auf das System ETCS stattgefunden.

Der Vorgang der Entwicklung von Migrationsstrategien stellt auf seinen unterschiedlichen Ebenen spezifische Anforderungen an die beteiligten Instanzen. Deswegen war es sinnvoll, eine erstmalige Einordnung dieses Prozessschrittes entlang der Phasen des betriebswirtschaftlichen Planungsprozesses vorzunehmen. Eine Vorstellung der ETCS-Migrationsstrategien auf einzelnen dieser Ebenen stellte wieder den Bezug zu dem Anwendungsbeispiel her. Eine Diskussion der netzwerkökonomischen Effekte stellt in diesem Zusammenhang einen erstmaligen Ansatz dar. Dieser Ansatz wird vom Autor als ein möglicher Ausgangspunkt für weiterführen-

de wissenschaftliche Untersuchungen angesehen. Dabei gilt es vor allem, Begriffe wie *kritische Masse* und *Switching Costs* sowie die damit im Zusammenhang stehenden Gesetzmäßigkeiten zu analysieren.

Für die Bewertung der Migrationsstrategien wurde eine Berechnungsvorschrift aufgestellt, deren Ausführung mit Hilfe einer im Rahmen dieser Forschungsarbeit entstandenen Software unterstützt wird. Die bereits eingeleitete Weiterentwicklung dieses Software-Tools soll künftig u. a. eine korridororientierte Optimierung von Migrationsstrategien ermöglichen.

Für die Anwendung der vorgestellten toolunterstützten Methodik wurde eine Fallstudie konstruiert, anhand derer die ETCS-Migrationsplanung auf einem Beispielkorridor bzw. auf den ausgewählten Abschnitten durchgeführt wurde. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Methodik die Voraussetzungen bereit stellt, anhand der beschriebenen Annahmen hinsichtlich der Kennzahlen, Randbedingungen und Bewertungskriterien eine Handlungsempfehlung zu formulieren. Diese Handlungsempfehlung beinhaltet sowohl das optimale Zielsystem als auch die dazugehörige Migrationsstrategie, wobei die Gültigkeit der Aussagen an die aufgestellten Annahmen gekoppelt ist.

Die im Zusammenhang mit dem System ETCS herauszustellende Datenunsicherheit hinsichtlich der Kostensätze macht eine global gültige Aussage zurzeit nicht möglich.

Eine weitere, mit der ETCS Migration an einigen Stellen verknüpfte Fragestellung ist die Migration der Stellwerkstechnologie. Die Landschaft der verwendeten Stellwerksbauformen in Deutschland ist besonders vielfältig. Sie reicht von mechanischen und elektromechanischen bis hin zu Relais- und elektronischen Stellwerken. Ein Grund für diese Vielfalt ist die lange Lebensdauer der Alttechniken einerseits und die immer schneller werdenden Innovationszyklen der Informations- und Rechnertechnologie andererseits. Der Zwang zur verstärkten Ablösung der Alttechnik liegt u. a. in einer zunehmenden Überalterung und der Inkompatibilität zu neuen Systemen, wie ETCS, begründet. Dabei ist der Lebenszyklus eines modernen elektronischen Stellwerks ebenfalls nicht als homogen zu verstehen. Die Systemanteile mit der geringsten Lebensdauer determinieren aufgrund der fehlenden Migrationsfähigkeit die Lebensdauer der gesamten Anlage. Deswegen fordern die Betreiber der Technik skalierbare Anlagen, die auf Basis von Standardschnittstellen eine stufenweise Migration ermöglichen. Das künftige Design der Stellwerke wird den Grundsatz der Migrationsfähigkeit berücksichtigen müssen.

Der Autor sieht in diesem Thema ein weiteres Anwendungsgebiet, das mit seinen spezifischen Randbedingungen ein anspruchsvolles Feld für die Migrationsforschung aufspannt.

Letztlich ist die Fragestellung nach der Migrationsfähigkeit und dem daran orientierten Design von Systemen der Eisenbahn-LST im Rahmen der Erstellung dieser Arbeit als Bedarf identifiziert, jedoch aufgrund des hier aufgespannten inhaltlichen Rahmens nicht adressiert worden. Die Gestaltung von Schnittstellen, die Systemskalierbarkeit sowie die optimale Funktionsallokation stellen dabei einige der zentralen Parameter dar. Eine Untersuchung dieses Themenbereichs kann dabei die in dieser Arbeit nicht fokussierte Sicht der Signalbauindustrie adressieren und mit den Ergebnissen die Innovationskraft des Systems Schiene stärken.

Die Strategiefindung für die Einführung von ETCS unterliegt in Deutschland aber auch in ganz Europa einem ständigen Fortschreibungsprozess. Dabei wird die Entscheidung über die einzusetzenden Ausrüstungsstandards (ETCS-Level und die dazugehörige SRS-Version) den aktuellen Randbedingungen angepasst. Die Abkehr der Strategie von Infrastrukturbetreibern, die Korridore durchgängig mit ETCS Level 2 auszurüsten hin zu einem Mix aus Level 2 und Level 1 Limited Supervision macht dies u. a. deutlich. Nicht nur aufgrund der hohen Migrationskosten ist in diesem Umfeld eine Objektivierung des Entscheidungsprozesses anzustreben, um die Investitionsmittel bedarfsgerecht und nachhaltig richtig einzusetzen. Die in dieser Arbeit vorgestellte Methodik kann dazu beitragen und bietet somit ein Werkzeug für künftige Entscheidungen.

Integrierte Bahngesellschaften sind des Weiteren daran interessiert, bei der Wahl ihrer Migrationsstrategie ein Konzernoptimum zu identifizieren. Die Berücksichtigung der beiden Systemanteile Fahrzeug und Strecke in der vorliegenden Methodik macht diesen Prozess ebenso möglich, wie auch die Quantifizierung der Kosten- und Nutzenanteile der jeweiligen Geschäftsfelder bzw. der entsprechenden EIU und EVU.

Das Potential dieser Arbeit liegt somit in der Objektivierung der Entscheidungen für die zu tätigen Investitionen in die ETCS-Migration und der damit realisierbaren Kostensenkung im investiven sowie im operativen Bereich auf Basis der Identifikation der fallweise optimalen Zielsysteme und der jeweiligen Migrationsstrategien.

Die ETCS-Migration wird die europäischen Bahnen in den nächsten Jahren und Jahrzehnten vor große Herausforderungen und komplexe Entscheidungssituationen stellen. Eine möglichst objektive und systematisch erzeugte Basis für diese Entscheidungen wird für den betrieblichen und wirtschaftlichen Erfolg der beteiligten Unternehmen essenziell sein.

Mit dieser Arbeit soll ein Beitrag zur Optimierung der ETCS-Migrationsplanung geliefert werden mit der Hoffnung, durch das steigende Maß an Interoperabilität das zusammen wachsende Europa auch auf der Schiene zu manifestieren.

Abkürzungsverzeichnis

BCG	Boston Consulting Group
BTM	Balise Transmission Module
CCS	Control Command Signalling
CER	Community of European Railway and Infrastructure Companies
CH	Schweiz
CR	Change Request
D	Deutschland
DB AG	Deutsche Bahn Aktiengesellschaft
DIN EN	Deutsche Industrienorm Europäische Norm
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DMI	Driver Machine Interface
EBO	Eisenbahnbau- und -betriebsordnung
EG	Europäische Gemeinschaft
EIM	European Infrastructure Manager
EIU	Eisenbahn-Infrastrukturunternehmen
ERTMS	European Rail Traffic Management System
ESTW	Elektronisches Stellwerk
ETCS	European Train Control System
ETM	Eurobalise Transmission Module
EU	Europäische Union
EVC	European Vital Computer
EVU	Eisenbahn-Verkehrsunternehmen
EWA	Erweiterte Wirtschaftlichkeitsrechnung
GFM	Gleisfreimeldung

GSM-R	Global Standard for Mobile Communication - Railway
HGV	Hochgeschwindigkeitsverkehr
HV	Hauptsignal / Vorsignal
IK	Interoperabilitätskomponenten
ISO / OSI	International Standard Organisation / Open System Interconnection
IT	Informationstechnologie
ITS	Institut für Verkehrssystemtechnik
IuK	Information und Kommunikation
KI	Kapazitätsindex
L1, L2	ETCS Level 1, ETCS Level 2
LC	Life-Cycle
LCC	Life-Cycle-Costing
LCM	Life-Cycle-Management
LEU	Lineside Electronic Unit
LS	Limited Supervision
LST	Leit- und Sicherungstechnik
LZB	Linienförmige Zugbeeinflussung
MoU	Memorandum of Understanding
NL	Niederlande
NWA	Nutzwertanalyse
PZB	Punktförmige Zugbeeinflussung
RBC	Radio Block Center
RIU	Radio Infill Unit
RoI	Return on Investment
RSTW	Relaisstellwerk
RTM	Radio Transmission Module

SRS	System Requirements Specification
STE	Stelleinheit
STM	Specific Transmission Module
STW	Stellwerk
TEIV	Transeuropäische Eisenbahn-Interoperabilitätsverordnung
TEN	Transeuropean Network
TN	Teilnutzen
TSI	Technische Spezifikation für Interoperabilität
UIC	Union Internationale des Chemins de fer
UNIFE	Union des industries ferroviaires européennes
UZ	Unterzentrale
ZUB	Zugbeeinflussung (Schweiz)
ZZS	Zugsteuerung Zugsicherung Signalgebung

Literaturverzeichnis

- [1] **Achatz, B.; Boestfleisch, I.; Krieg, S. (2002):** Die Migrationsstrategie der Deutschen Bahn AG zur Einführung moderner Leit- und Sicherungstechniken, in Leit- und Sicherungstechnik für die Bahn von morgen. Beiträge des 1. Bahnforums der DVWG „Die Zukunft des Schienenverkehrs“ am 26.09.2002 in Berlin, Bergisch Gladbach 2002.
- [2] **Altrogge, G. (1988):** Investition, München, Wien 1988
- [3] **Backhaus, K. (Hrsg), Aufderheide, D., Spöth, G.-M. (1994):** Marketing für Systemtechnologien: Entwicklung eines ökonomisch begründeten Geschäftstypen Ansatzes, Stuttgart 1994.
- [4] **Bamberg G., Coenenberg, A. G. (2004):** Betriebswirtschaftliche Entscheidungslehre, 12. Auflage, München 2004
- [5] **Barak, V. (1997):** Systemmigration, Deutscher Universitätsverlag Wiesbaden 1997.
- [6] **Beck, K., (2005):** Methodik zur Gestaltung eines migrationsfähigen Systemdesigns am Beispiel der Zugbeeinflussung, Diplomarbeit; Braunschweig, 2005
- [7] **Berger, R., Capeza-López, P., Clipperton, P., Erb, N., Gillan, D., Kaminsky, R., Poré, R. (2005):** Hin zu einem koordinierten Einsatz ERTMS/ETCS im Europäischen Netz, Signal + Draht (97) 7+8/2005, S.6-10
- [8] **Bialonn, A., Kubica, M., Trzonski, K. (2004):** Estimated costs of implementation ERTMS/ETCS for the section of Katowice – Wisla Bridge – Zwardon railway line, 4th International Conference Transport Systems Telematics TST'04
- [9] **Bikker, G. / Schroeder, M. (2002):** Methodische Anforderungsanalyse und automatisierter Entwurf sicherheitsrelevanter Eisenbahnleitsysteme mit kooperierenden Werkzeugen, Düsseldorf 2002
- [10] **Blohm, H., Lüder, K., Schäfer C. (2006):** Investition, 9. Auflage, München 2006
- [11] **Bormet, J. (2007):** Anforderung des Betreibers an den Life-cycle in der Fahrwegsicherungstechnik, Signal & Draht (99) 1+2/2007
- [12] **Brugger, P. (1990):** Migration durch Koexistenz von proprietären und UNIX-Betriebssystemen, in: Theorie und Praxis der Wirtschaftsinformatik: Migrationsstrategien, Heft 156, 27. Jahrgang, Wiesbaden: Forkel Verlag, 11/1990, S 60 – 70
- [13] **Bundesministerium der Justiz (1967):** Eisenbahnbau- und -betriebsordnung
- [14] **DIN EN 60300-3-3:2004 (2004):** Zuverlässigkeitsmanagement – Teil 3-3: Anwendungsleitfaden – Lebenszykluskosten
- [15] **Dräger, U. (2004):** ETCS und der Übergang zu den nationalen Zugsicherungssystemen der DB AG, Signal + Draht (96) 11/2004

- [16] **Dreimann, K. (2005):** ETCS – Technik und Strategie, Bericht über die Fachtagung der DMG-Bezirksgruppe Berlin am 04.03.2005, Deutsche Maschinentechnische Gesellschaft, Forum für innovative Bahnsysteme
- [17] **Economides, N. (1996):** The Economics of Networks, in International Journal of Industrial Organization, Vol. 14, no., S. 673-699
- [18] **Hartmann, J. (2005):** Weitere ETCS- Planungen Level 1 und Level 2 bei der DB AG, Signal + Draht Kongress 2005
- [19] **Hecker, F. (1997):** Die Akzeptanz und Durchsetzung von Systemtechnologien – Marktbearbeitung und Diffusion am Beispiel der Verkehrstelematik, Diss. Saarbrücken 1997
- [20] http://ec.europa.eu/transport/rail/index_de.html; 07/2008
- [21] **Janhsen, A., Lemmer, K., Meyer zu Hörste, M., Schnieder, E. (1997):** Migration Strategy for Different Level of the European Train Control System to Existing Railway Environment, Kongressbeitrag, WCRR Florenz, Vol. C, S.335-341
- [22] **Kaminsky, R. (2007):** Neue Infrastruktur im europäischen Schienenverkehr – Herausforderung und Chance, transport logistic 2007, München
- [23] **Katz, M. L. / Shapiro, C. (1985):** Network Externalities, Competition and Compatibility, in: The American Economic Review, Vol. 75, No.3, S. 424-440.
- [24] **Knollmann, V. (2007):** UML-basierte Testfall- und Systemmodelle für die Eisenbahnleit- und -sicherungstechnik, Braunschweig 2007
- [25] **Knollmann, V., Obrenovic, M., Jäger, B., Lemmer, K. (2005):** Optimized Migration Process in Rail Traffic Using Simulation Support. Proceedings of the 1st International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis, Delft, 2005
- [26] **Kollmannsberger, F., Kilian, L., Mindel, K. (2003):** Migration von LZB zu ETCS – Streckenseitige Parallelausrüstung LZB/ETCS, Signal + Draht (95) 3/2003, S. 6-11
- [27] **Kommission der Europäischen Gemeinschaften (2005):** Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament und den Rat über die Einführung des Europäischen Zugsicherungs-/ Zugbeeinflussungs- und Signalgebungssystems ERTMS/ ETCS vom 04.07.2005,
http://europa.eu.int/comm/transport/rail/interoperability/doc/com_2005_0298_de.pdf
- [28] **Koordinierungs- und Beratungsstelle der Bundesregierung für Informationstechnik in der Bundesverwaltung im Bundesministerium des Innern (2003):** Leitfaden für die Migration der Basissoftwarekomponenten auf Server- und Arbeitsplatzsystemen, Version 1.0; Schriftenreihe der KBSt, ISSN 0179-7256, Band 57, Juli 2003
- [29] **Lackhove, C., (2007):** Modellierung der Einflussparameter für die Strategiewahl bei der Migration neuer Systeme der Produktionssteuerung im Eisenbahnbetrieb, Diplomarbeit; Braunschweig, 2007

- [30] **Lemmer, K., Meyer zu Hörste, M., Schnieder, E. (2003):** Migrations- und Einsatzstrategien für Systeme der Eisenbahnleittechnik, ZEVrail Glasers Analen 127 (2003) 1 Januar, S. 44-47
- [31] **Lenkungskreis „Bahntechnologie“ im Deutschen Verkehrsforum (2005):** European Train Control System (ETCS) – Ein Standard für Europa, Positionspapier
- [32] **Mense, O. (2003):** European Train Control System – Von der UNISIG-Spezifikation zur Pilotanwendung, Signal + Draht (95), S.15-18
- [33] **Meyer zu Hörste, M., Obrenovic, M., Lemmer, K. (2006):** Technische, betriebliche und wirtschaftliche Aspekte der Migration neuer Technologien in komplexe Eisenbahnnetze am Beispiel der Einführung von ETCS auf dem Korridor Rotterdam - Genua. Rail Automation 2006
- [34] **Meyer zu Hörste, M. (2004):** Methodische Analyse und generische Modellierung von Eisenbahnleit- und -sicherungssystemen, Braunschweig 2004
- [35] **Mindel, K. (2001):** Migration von der LZB zu ETCS in Deutschland, Signal + Draht (93) 9/2001, S. 6-9
- [36] **Müller, C. (2003):** ETCS in der Serienerprobung – Deutschlands erste ETCS-Strecke zwischen Jüterborg und Bitterfeld in Betrieb, EI-Eisenbahningenieur (54) 9/2003, S. 42-44
- [37] **Müller, T., Althaus, H. (2002):** ETCS-Migration in der Schweiz mit Balisenlesegeräten, Signal + Draht (94) 1+2/2002, S. 31-32
- [38] **Obrenovic, M.; Jäger, B.; K. Lemmer, K (2005):** Integration der Migrationsmethodik in den Requirements Engineering-Prozess bei der Entwicklung technologischer Innovationen im System Bahn. - In: Proc. 20. Verkehrswissenschaftliche Tage, Dresden, 2005, Session 2d.
- [39] **Obrenovic, M., Jäger, B., Lemmer, K. (2006):** Development and Evaluation of Migration Strategies for the ETCS Level 1 applied on a Synthetic Track. Zel2006
- [40] **Obrenovic, M., Jäger, B., Lemmer, K. (2006):** Migration of the European Train Control System (ETCS) and its Impact on the International Transport Market. ETC 2006
- [41] **Obrenovic, M., Jäger, B., Lemmer, K. (2006):** Methodology for the LCC-Analysis and the Optimal Migration of the Railway Operations Control on the Example of ETCS. Comrail 2006, Computers in Railways X.
- [42] **Obrenovic, M., Knollmann, V., Jäger, B., Lemmer, K. (2005):** Methodik für die Entwicklung, Bewertung und simulative Validierung von Migrationsstrategien. Zel 2005. 12th International Symposium. Railways on the Edge of the 3rd Millennium "On the way towards the 'European' Railway - Harmonisation and ITS"
- [43] **Obrenovic, M., Meyer zu Hörste, M., Jäger, B. (2005):** Phase Model for the Development and Evaluation of Migration Strategies in Rail Traffic. HITS Hannover, ITS at the Crossroads of European Transport, Proceedings

- [44] **Pachl, J. (2004):** Systemtechnik des Schienenverkehrs. Betrieb planen steuern und sichern, 4. Auflage, Wiesbaden 2004
- [45] **Pahl G., Beitz W., Feldhusen J., Grote K.-H. (2007):** Konstruktionslehre, 7. Auflage, Berlin / Heidelberg 2007
- [46] **Policy Research Corporation (2006):** Cost-Benefit Analysis ETCS Corridor Rotterdam Genoa, Abschlussbericht
- [47] **Pomerol, J.-C./ Barba-Romero S. (2000):** Multicriterion Decision in Management: Principles and Practice, Norwell, USA (Kluwer Academic Publishers) 2000
- [48] **Richtlinie 2001/16/EG** des Europäischen Parlaments und Rates vom 19. März 2001 über die Interoperabilität des konventionellen transeuropäischen Eisenbahnsystems
- [49] **Richtlinie 96/48/EG** des Rates vom 23. Juli 1996 über die Interoperabilität des transeuropäischen Hochgeschwindigkeitssystems
- [50] **Saß, H. D. (2000):** Modernisierung individueller Client-Server-Systeme im laufenden Betrieb für technische Bildungsdienstleister mit mehreren Standorten. Diss. RWTH Aachen 2000
- [51] **Scheppen, M. (2006):** Der Zugleitbetrieb – das Betriebsverfahren für einfache betriebliche Verhältnisse, Deine Bahn 12/2006
- [52] **Sneed, H.-M., Sneed, S. (2003) :** Web-basierte Systemintegration, Braunschweig / Wiesbaden 2003
- [53] **Spaans, C. (2004):** Migration to GSM-R in the Netherlands, Signal + Draht (96) 4/2004
- [54] **Stadler, O., Trümpi, A. (2003):** Netzweiter Einsatz von ERTMS/ETCS bei den Schweizerischen Bundesbahnen, Signal + Draht (95) 3/2003, S.11-14
- [55] **Steimer, F. (1990):** Migration im Umfeld der Kommunikationstechnik, in: Theorie und Praxis der Wirtschaftsinformatik: Migrationsstrategien, Heft 156, 27. Jahrgang, 11/1990, S. 33 - 43
- [56] **Steiner, M. (2003):** Migration bei Stellwerken zur Beherrschung des technologischen Wandels, Signal + Draht (95) 6/2003, S. 11-13
- [57] **Stephan S. (1999):** Migrationsstrategien in der Leittechnik, Aachen 1999
- [58] **TSI CCS:** <http://ec.europa.eu/transport/rail/interoperability/doc/ccs-tsi-de-annex.pdf> (07/2008)
- [59] **Van der Werff, M., Scholten, H., Godziejewski, B. (2002):** Migration Strategy for Signalling Systems in the Netherlands, Signal + Draht (94), S.43-48
- [60] **Verordnung (EG) Nr. 680/2007** des europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2007 über die Grundregeln für die Gewährung für Gemeinschaftszuschüssen für transeuropäische Verkehrs- und Energienetze, 2007
- [61] **Wendel, S. (2008):** Korridor Rotterdam – Genua, Schlagader des Europäischen Schienengüterverkehrs der Zukunft, Deine Bahn 6/2008

- [62] **Wendler, E. (2007)** : Influence of the European Train Control System ETCS on the performance behaviour of railway facilities, UIC ERTMS Conference, Bern 2007
- [63] **Winter, P. (2003)**: Implementing the European Train Control System / Opportunities for European Rail Corridors. Bericht auf der UIC ERTMS Konferenz, Leipzig, 2003
- [64] **Zangemeister, C. (1993)**: Erweiterte Wirtschaftlichkeits-Analyse (EWA) – Grundlagen und Leitfaden für ein „3-Stufen-Verfahren“ zur Arbeitssystembewertung, Dortmund 1993

A Anhang

A.1 Kostenbasis für die Bewertung der Migrationsstrategien	124
A.2 Auswertungen der Migrationskosten und der Migrationdauer	125
A.3 Berechnungen im Rahmen der EWA	128
A.4 Migrationstool	129

A.1 Kostenbasis für die Bewertung der Migrationsstrategien

Die Abbildung 49 zeigt die Kostenbasis für die Berechnungen im Hauptteil.

			ETCS Level 1	ETCS Level 1 LS	ETCS Level 2	Nationales System PZB	
Streckenseitige Ausrüstung	Anschaffung und Installation	Kostensatz	120.000 € pro Streckenkilomter	70.000 € pro Streckenkilomter	220.000 € pro Streckenkilometer	0 €	
		Anmerkung	Kalkulationsannahme	Kalkulationsannahme	Kalkulationsannahme	Keine neuen Investitionen auf dem betrachteten Korridor	
	Instandhaltung	Kostensatz	9.000 € pro Streckenkilometer p. a.	7.000 € pro Streckenkilomter p. a.	7.000 € pro Streckenkilometer p. a.	14.000 € pro Streckenkilomter	
		Anmerkung	Kalkulationsannahme	Kalkulationsannahme	Kostensatz DB AG / ca. 3% des Anschaffungspreises	Kalkulationsannahme	
	Fahrzeugeitige Ausrüstung	Anschaffung und Installation	Kostensatz	300.000 € pro Fahrzeugsystem	300.000 € pro Fahrzeugsystem	300.000 € pro Fahrzeugsystem	0 €
			Anmerkung	Kalkulationsannahme	Kalkulationsannahme	Kalkulationsannahme	Keine Investitionen angenommen
Instandhaltung		Kostensatz	9.000 € pro Fahrzeugsystem	9.000 € pro Fahrzeugsystem	9.000 € pro Fahrzeugsystem	18.000 € pro Fahrzeugsystem	
		Anmerkung	Kostensatz DB AG / ca. 3% des Anschaffungspreises	Kostensatz DB / ca. 3% des Anschaffungspreises	Kostensatz DB AG / ca. 3% des Anschaffungspreises	Kalulationsannahme	
		Annahme Kalkulationszinssatz		6%			

Abbildung 49: Datenbasis für die in der Fallstudie durchgeführte Kalkulation

Die für die Fallstudie angenommenen Umrüstungskapazitäten sind:

- 4 Fahrzeuge p. a.
- 50 Streckenkilometer p. a.

A.2 Auswertungen der Migrationskosten und der Migrationdauer

Im Folgenden sind die Auswertungen der Migrationsstrategien für die im Abschnitt 5.4 betrachteten Systeme und Streckenabschnitte dargestellt.

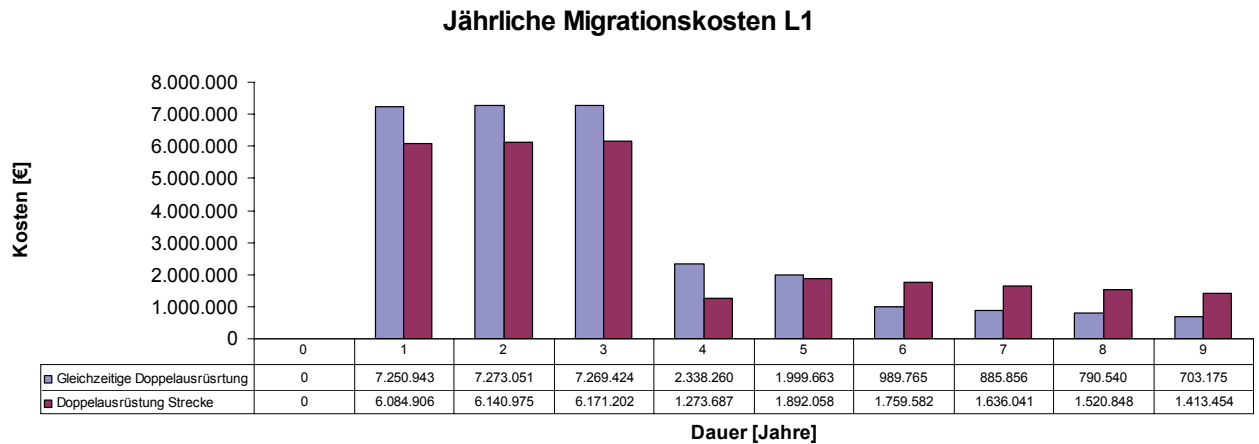


Abbildung 50: Jährliche Migrationskosten Abschnitt 4 Level 1

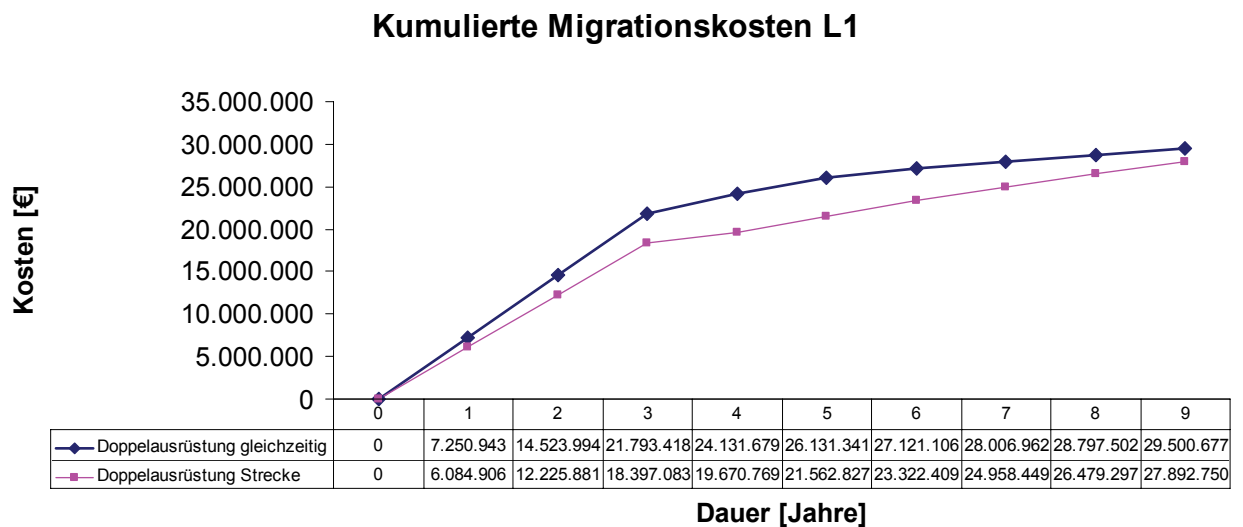


Abbildung 51: Kumulierte Migrationskosten Abschnitt 4 Level 1

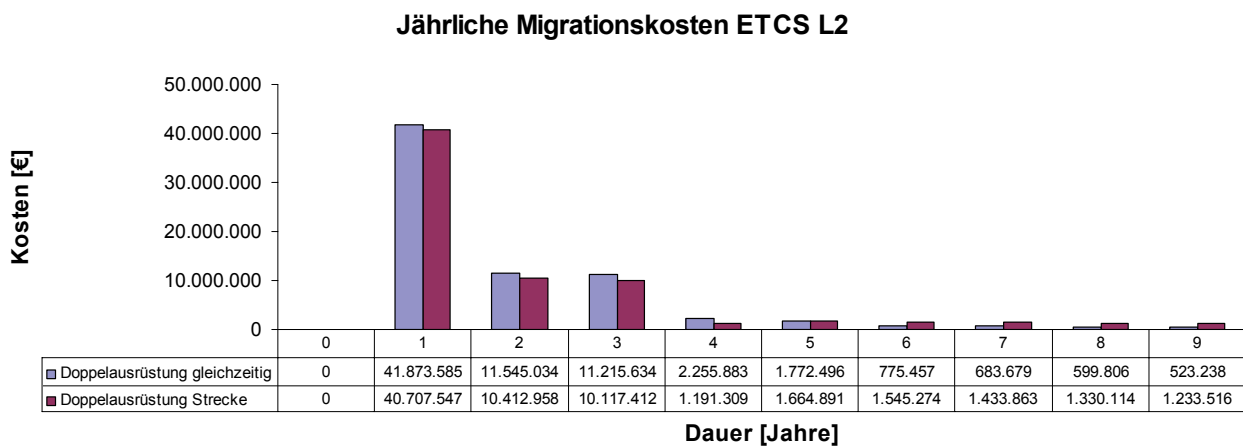


Abbildung 52: Jährliche Migrationskosten Abschnitt 4 Level 2

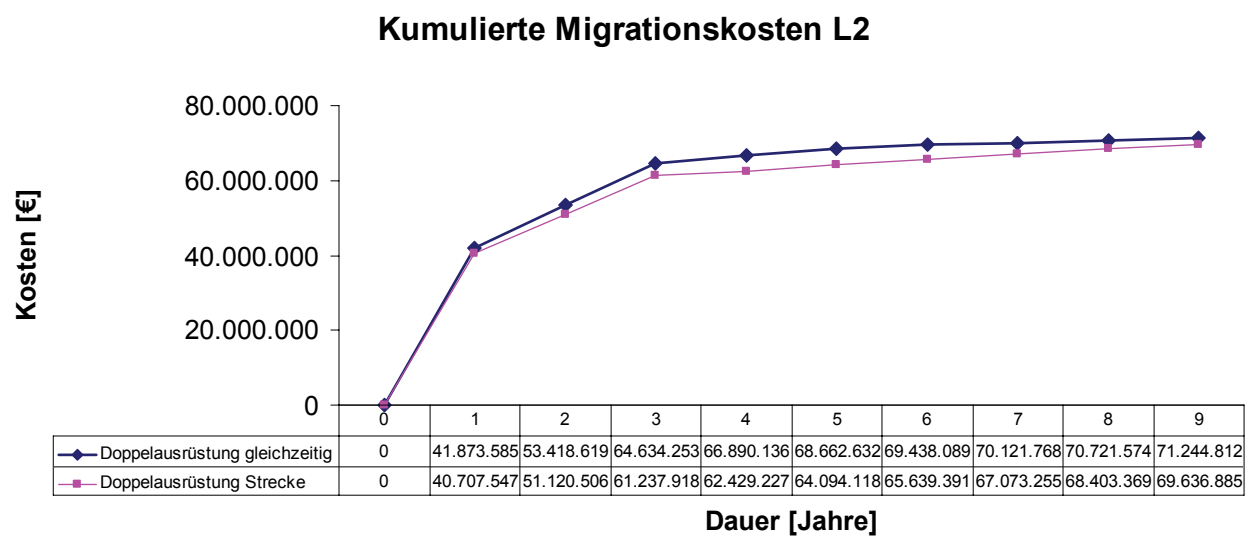


Abbildung 53: Kumulierte Migrationskosten Abschnitt 4 Level 2

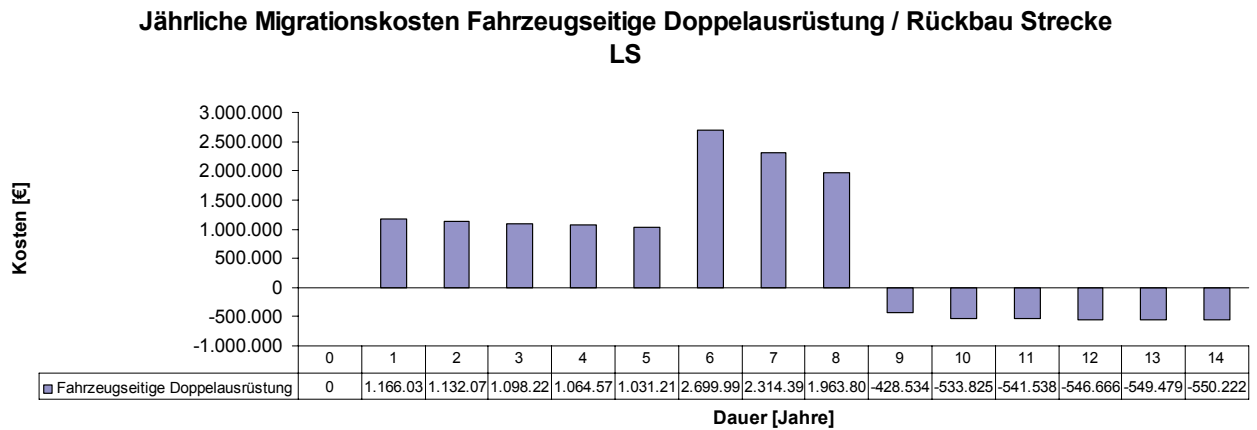


Abbildung 54: Jährliche Migrationskosten Abschnitt 4 Alternativstrategie Limited Supervision

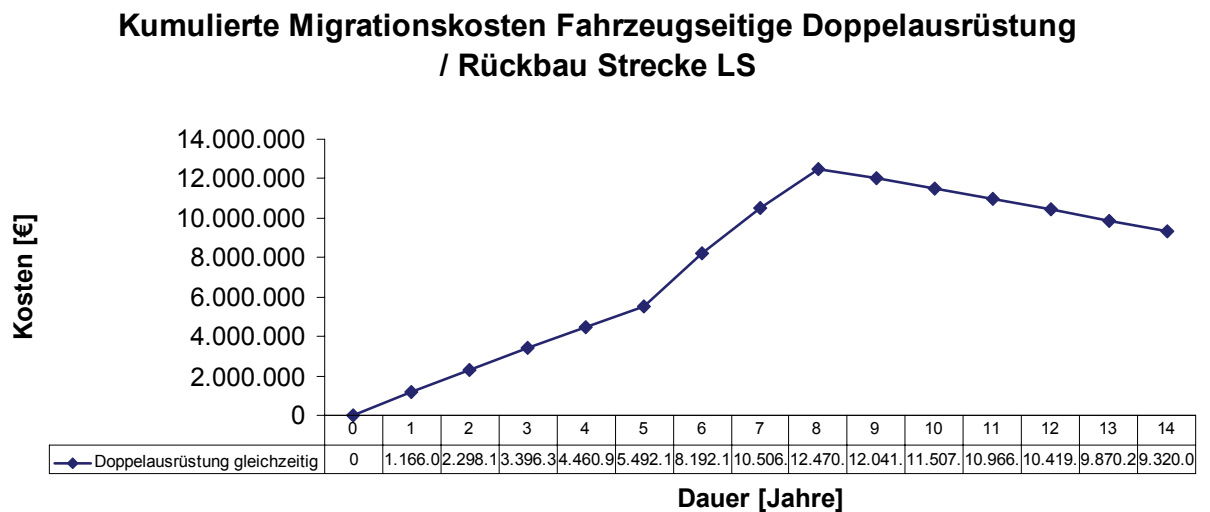


Abbildung 55: Kumulierte Migrationskosten Abschnitt 4 Alternativstrategie Limited Supervision

A.3 Berechnungen im Rahmen der EWA

In der Tabelle 19 ist die Berechnung der Nutzwerte dargestellt. Teilnutzen einzelner Systeme hinsichtlich der jeweiligen Kriterien ist zusätzlich zu dem maximal zu erreichenden Teilnutzen ins Verhältnis gestellt (Teilnutzen / Teilnutzen max). In den Spalten Teilergebnis sind ist die Gewichtung der Kriterien berücksichtigt, so dass hier der jeweilige Beitrag zum Nutzwert nach der Berechnungsvorschrift

Teilergebnis = Teilnutzen * Gewichtung / 100

errechnet wird. Hier ist das maximal zu erreichende Teilergebnis ebenfalls dargestellt.

	Gewichtung [%]	ETCS Level 1	Teilergebnis NWA ETCS Level 1	ETCS Level 1 LS	Teilergebnis NWA ETCS Level 1 LS	ETCS Level 2	Teilergebnis NWA ETCS Level 2
Kostenbeeinflussung des Systems LST	50,0	5 / 10	2,5 / 5	5 / 10	2,5 / 5	0 / 10	0 / 5
Kapazität	25,0	1 / 10	0,25 / 2,5	3,5 / 10	0,875 / 2,5	9,5 / 10	2,375 / 2,5
Migrationsdauer	25,0	10 / 10	2,5 / 2,5	10 / 10	2,5 / 2,5	10 / 10	2,5 / 2,5
Gesamtnutzwert	100,0		5,25 / 10		5,875 / 10		4,875 / 10

Tabelle 19: Nutzwernermittlung

A.4 Migrationstool

Da für verschiedene Anwendungen auch unterschiedliche Kennzahlen relevant sein können, ist es über die Auswahlmaske (Abbildung 56) möglich, die jeweiligen Größen manuell für die Auswertung zusammen zu stellen.

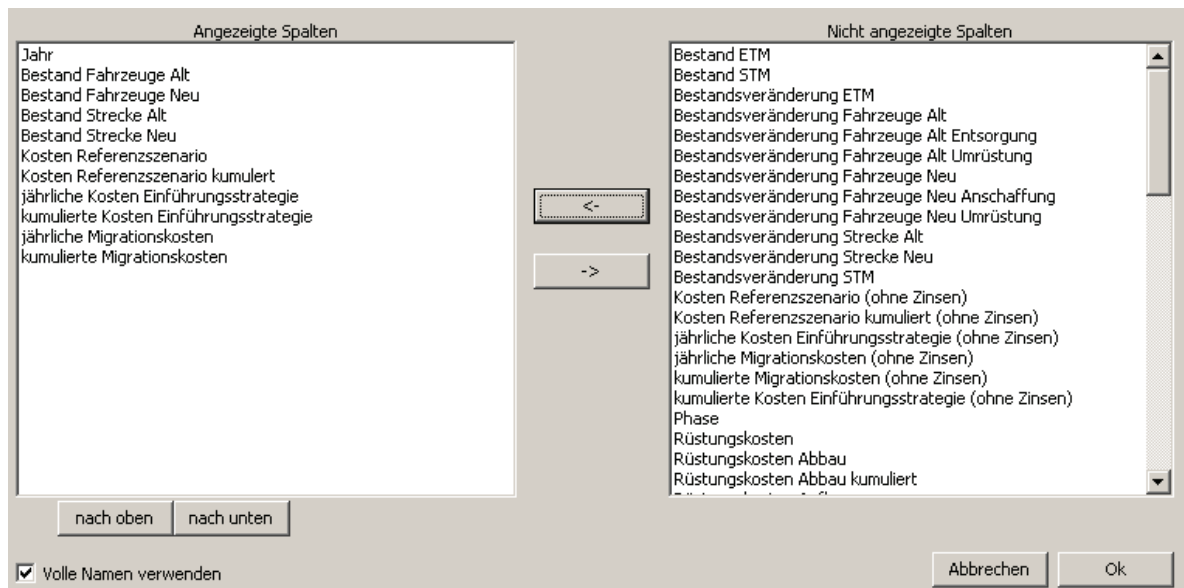


Abbildung 56: Maske für die Auswahl von anzuzeigenden Kennzahlen

Falls eine Migrationsstrategie untersucht werden soll, die von den Basisstrategien abweicht – beispielsweise durch den Entfall des Rückbaus des Altsystems – kann eine manuelle Konfiguration der Strategie im Tool vorgenommen werden (Abbildung 57).

DLR Migrationstool 0.9.7

Migration

- # A_W_Abschnitt1_Level2
- # A_W_Abschnitt2
- # A_W_Abschnitt3
- # A_W_Abschnitt4
 - Neues Szenario
 - Neue Strategie (Beidseitige Doppelausrüstung)
 - Neue Strategie (Manuelle Strategie)
 - Neue Strategie (Doppelausrüstung Streckens)
 - Manuelle Strategie_doppel_gleichzeitg_dss
 - Bestandsveränderung
 - Zusatz Information
 - Manuelle Strategie_doppel_strecke_dss
 - Neue Strategie (Doppelausrüstung Fahrzeuge)
 - Neues Szenario
- # A_W_Abschnitt5
- # A_W_Abschnitt6
 - Neues Szenario
 - Neue Strategie (Beidseitige Doppelausrüstung)
 - Neue Strategie (Manuelle Strategie)
 - Bestandsveränderung
 - Zusatz Information
 - Neue Strategie (Doppelausrüstung Streckens)
 - Neue Strategie (Manuelle Strategie)
- # A_W_Abschnitt7
- # A_W_Abschnitt1_Level1
- Abschnitt4_Level1
- Neues Szenario
- Abschnitt4_Level2

Neuer Anwendungsfall

Neues Szenario

Neue Strategie

Umbenennen

Jahr	BV Fahrzeuge Alt	BV Fahrzeuge Neu	BV Strecke Alt	BV Strecke Neu	BV STM	BV ETM
AnfangsBestand	20	0	152	0	0	0
1	0	4	0	50	0	0
2	0	4	0	50	0	0
3	0	4	0	50	0	0
4	0	4	0	2	0	0
5	-4	4	0	0	0	0
6	-4	0	0	0	0	0
7	-4	0	0	0	0	0
8	-4	0	0	0	0	0
9	-4	0	0	0	0	0
EndBestand	0	20	152	152	0	0

Jahr ans Ende hinzufügen gewähltes Jahr entfernen Speichern

Abbildung 57: Eingabemaske für die manuelle Strategie